



Gregor Schmölzer, Dipl.Ing.

**Tunnellüftungsanlagen und deren Regelung -  
Messungen und Untersuchungen  
für eine erfolgreiche Inbetriebnahme**

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer/in

ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Sturm  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Zweitbetreuer/in

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben

Graz, Dezember 2016



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichseder



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Projektassistent am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der Technischen Universität Graz. Für die Möglichkeit zur Durchführung möchte ich mich daher bei Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder recht herzlich bedanken.

Herrn A.o.Univ.-Prof. Dr. Peter Sturm, dem Leiter der Arbeitsgruppe Verkehr und Umwelt (V&U), gebührt hierbei mein besonderer Dank, da er durch sein Vertrauen und den zur Verfügung gestellten Freiraum maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein besonders großes Dankeschön gilt den beiden Messtechnikern des Instituts, Herrn Ing. Thomas Nöst und Herrn Philip Leonhardt, ohne deren Engagement und Einsatz die zum Teil äußerst aufwendigen und langwierigen durchgeführten Messungen, welche die Grundlage dieser Arbeit bilden, niemals in dieser Form möglich gewesen wären.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Kollegen des Fachbereiches Verkehr und Umwelt, insbesondere den Mitarbeitern des Arbeitsbereichs Tunnellüftung & Tunnelsicherheit bedanken. Durch die unterschiedlichen Sicht- und Herangehensweisen, lieferten sie immer wieder interessante Anregungen und Ideen und trugen durch die daraus resultierenden Diskussionen ebenfalls indirekt (aber nicht unwesentlich) zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Graz, im Dezember 2016

Gregor Schmörlzer

# Inhaltsverzeichnis

<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>XI</b>
<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MESSUNG DER MITTLEREN STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT .....</b>	<b>5</b>
2.1 ALLGEMEINES .....	5
2.2 AUFGABENSTELLUNG/ZIEL DER MESSUNGEN .....	5
2.3 NETZMESSUNGEN IN TUNNELQUERSCHNITTEN.....	8
2.3.1 Messaufbau und Messprogramm.....	8
2.3.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren.....	26
2.3.3 Abschätzung der Messunsicherheiten .....	28
2.3.4 Mess- und Berechnungsergebnisse .....	32
2.4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	48
2.4.1 Zusammenfassung Netzmessung im Kasten- / Rechteckprofil.....	48
2.4.2 Zusammenfassung Netzmessung im Hufeisenprofil.....	49
2.4.3 Schlussfolgerungen .....	50
<b>3 MESSUNG DES EFFEKTIV EINGEBRACHTEN SCHUBS IM TUNNEL .....</b>	<b>52</b>
3.1 ALLGEMEINES .....	52
3.2 AUFGABENSTELLUNG/ZIEL DER MESSUNGEN .....	54
3.3 SCHUBEINBRINGUNG VON FRISCHLUFTIMPULSSYSTEMEN.....	55
3.3.1 Messaufbau und Messprogramm.....	55
3.3.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren.....	59
3.3.3 Abschätzung der Messunsicherheiten .....	64
3.3.4 Mess- und Berechnungsergebnisse .....	65
3.4 SCHUBEINBRINGUNG VON STRAHLVENTILATOREN .....	73
3.4.1 Messaufbau und Messprogramm.....	73
3.4.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren.....	82
3.4.3 Bestimmung der Messunsicherheiten .....	85
3.4.4 Mess- und Berechnungsergebnisse .....	86
3.5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	91
3.5.1 Zusammenfassung Schubeinbringung von Impulssystemen .....	92
3.5.2 Zusammenfassung Schubeinbringung von Strahlventilatoren.....	93
3.5.3 Schlussfolgerungen .....	93
<b>4 AUFÜHRUNG / INBETRIEBNAHME VON REGLERN ZUR LÜFTERSTEUERUNG .....</b>	<b>95</b>
4.1 ALLGEMEINES .....	95
4.2 AUFGABENSTELLUNG/ZIEL DER MESSUNGEN .....	96
4.3 EXPERIMENTELLE IDENTIFIKATION DER REGELSTRECKE .....	98
4.3.1 Aufzeichnung der Sprungantworten .....	98
4.3.2 Anwendung des Wendetangentenverfahrens .....	100
4.3.3 Alternative für $PT_n$ -Übertragungsfunktionen: die Zeitprozentkennwertmethode.....	103
4.3.4 Zusammenfassung / Vergleich der Übertragungsfunktionen .....	106
4.4 AUSFÜHRUNG DES REGLERS / STEUERUNGSTECHNISCHE MAßNAHMEN .....	110
4.4.1 Beurteilung der Regelbarkeit der Strecke .....	110
4.4.2 Auswahl eines geeigneten Reglers .....	111
4.4.3 Ausführung des gewählten Reglers .....	112
4.4.4 Zusätzliche steuerungstechnische Maßnahmen.....	114
4.5 EINSTELLREGELN FÜR PI-REGLER / ERSTPARAMETRIERUNG.....	117
4.5.1 Einstellregeln nach Ziegler und Nichols .....	117
4.5.2 Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK.....	118
4.5.3 Einstellregeln nach LATZEL.....	119
4.5.4 Resultierende Parametersets für den Testtunnel (Tunnel Neumarkt – RFB Linz).....	119

---

4.6	VERGLEICHENDE REALTESTS DES FÜHRUNGS- UND STÖRVERHALTENS.....	121
4.6.1	<i>Führungsverhalten</i> .....	121
4.6.2	<i>Störverhalten</i> .....	135
4.6.3	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i> .....	150
4.7	OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN.....	153
4.8	ANWENDUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHEN ANLAGENTYPEN.....	155
4.8.1	<i>Tunnel mit Längslüftung und teilweise drehzahlgeregelten Strahlventilatoren</i> .....	155
4.8.2	<i>Tunnel mit Ablufthalbquerlüftung und netzbetriebenen Ventilatoren</i> .....	159
4.9	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	164
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDES CONCLUSIO UND AUSBLICK.....</b>	<b>168</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>173</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Regelquerschnitt, Querschnittsfläche
$AZ$	[s]	Anstiegszeit (Regelgüte)
$B$	[m]	Breite des Messquerschnitts
$b_i$	[m]	Vertikaler Achsabstand der Messgeraden $i$
$D$	[m]	Durchmesser des Messquerschnitts
$D_a$	[m]	Außendurchmesser
$d_{A;B}$	[Pa]	Kalibrieroffset (Strömungsrichtung A bzw. B) der Staudrucksonde
$D_h = \frac{4 \cdot A}{U}$	[m]	Hydraulischer Durchmesser
$D_i$	[m]	Innendurchmesser, Laufraddurchmesser
$F$	[N]	Kraft
$F_0$	[N]	Stand Schub des Strahlventilators
$F_{SV}$	[N]	Effektiver Schub des Strahlventilators
$g_i$	[m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht der Teilfläche $i$
$H$	[m]	Höhe des Messquerschnitts
$h_i$	[m]	Horizontaler Achsabstand der Messgerade $i$
$I$	[N]	Impulsstrom(stärke)
$k$	[-]	Installations- bzw. Einbaufaktor/ -wirkungsgrad des Strahlventilators
$\frac{k}{n}$	[-]	Randzonenfaktor gem. VDI/VDE 2640, Blatt 3
$k_{A;B}$	[Pa/mV]	Linearer Kalibrierfaktor (Strömungsrichtung A bzw. B) der Staudrucksonde
$k_{mx}$	[-]	Impulsumsetzungskoeffizient
$K_P$		Proportionalbeiwert des Reglers
$K_S$		Statische Verstärkung der Regelstrecke
$L$	[m]	Länge, Abstand
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Motordrehzahl
$n$	[n]	Ordnung des Systems der Regelstrecke
$n_H$	[-]	Horizontale Anzahl Messpunkte /-achsen
$n_V$	[-]	Vertikale Anzahl Messpunkte /-achsen
$P$	[kW]	Motorleistung
$p_{abs}$	[hPa]	Luftdruck absolut
$p_{dyn}$	[Pa]	Dynamischer Druck
$p_{stat}$	[Pa]	Statischer Druck
$PT_n$		Verzögerungselement n-ter Ordnung (Serienschaltung von n Verzögerungselementen 1. Ordnung mit gleicher Zeitkonstante)
$R$	[m]	Radius des Messquerschnitts
$R_i$	[m]	Radius der Teilkreisfläche $i$
$s$	[% bzw. 1/100]	Steigung, Längsneigung
$S$	[N]	Schub
$t_{10;50;90}$	[s]	Zeitprozentwerte (10%;50%;90%) für Zeitprozentkennwertmethode
$t_{AN}$	[s]	Anregelzeit (Regelgüte gem. DIN 19226)
$t_{AUS}$	[s]	Ausregelzeit (Regelgüte gem. DIN 19226)

$T_g$	[s]	Ausgleichszeit der Regelstrecke
$t_i$	[°C]	Lufttemperatur in Messebene i
$T_i$	[s]	Ersatzzeitkonstante des Verzögerungselements i
$T_n$	[s]	Nachstellzeit des Reglers
$T_t$	[s]	Totzeit der Regelstrecke
$T_u$	[s]	Verzugs- / Ersatztotzeit der Regelstrecke
$T_V$	[s]	Vorhaltezeit des Reglers
$U$	[m]	Umfang
$u_i$	[m/s]	Luftgeschwindigkeit in Messebene i
$U$	[-]	Ungleichförmigkeitsgrad gem. VDI/VDE 2640, Blatt 3
$\ddot{U}S$		Überschwingweite (Regelgüte gem. DIN 19226)
$u_{SV}$	[m/s]	Austrittsgeschwindigkeit des Strahlventilators
$v_{\varphi i}$	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschw. für die Messgerade mit der Winkelkoordinate $\varphi$
$v_{\square}$	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschw. im Quadrant
$\bar{v}$	[m/s]	Flächengewichtete, mittlere Strömungsgeschw. (ohne Randzonenkorrektur)
$\bar{v}_1$	[m/s]	Über den Umfang gemittelte Geschwindigkeit über die äußersten Teilkreisflächen
$\bar{v}_2$	[m/s]	Über den Umfang gemittelte Geschwindigkeit über die zweitäußersten Teilkreisflächen
$v_a$	[m/s]	Austrittsgeschwindigkeit des Strahlventilators
$v_i$	[m/s]	Lokale Strömungsgeschw. im Messpunkt i
$v_m$	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschw. im Messquerschnitt
$v_r$	[m/s]	Strömungsgeschw. am Messradius r (für konstantes $\varphi$ )
$x_a(t)$		Regelgröße als Funktion der Zeit
$x_e(t)$		Stellgröße als Funktion der Zeit
$y = y_P + y_I$	[-]	Gesamtstellgröße (Ausgang) des PI-Reglers
$y_i$	[m]	Wandabstand des Messpunkts i
$y_I$	[-]	Integralanteil der Stellgröße des Reglers
$y_P$	[-]	Proportionalanteil der Stellgröße des Reglers
$z$	[-]	Gesamtanzahl Messpunkte im Messquerschnitt
$\Delta p_{SV}$	[Pa]	Druckerhöhung durch Strahlventilator

### Konstanten

$R_L = 287,058$	[J/kgK]	Gaskonstante von Luft
-----------------	---------	-----------------------

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	[°]	Blattwinkel der Lamellen der Impulsklappe
$\delta_f$	[-]	Fehler Durchflussschwankung
$\delta_I$	[-]	Fehler Integration
$\frac{\delta_{qV}}{qV}$	[-]	Relative Toleranz für den Durchfluss
$\delta_v$	[-]	Fehler örtliche Geschwindigkeit
$\frac{\delta_v}{v}$	[-]	Relative Toleranz für die örtliche Geschwindigkeit

$\delta_{v1}$	[-]	Fehler Randzonenkorrektur
$\delta_y$	[-]	Fehler Messpunkteinstellung
$\delta_{\Delta p}$	[-]	Fehler Differenzdruck
$\delta_\varepsilon$	[-]	Fehler Kompressibilität
$\delta_\rho$	[-]	Fehler Dichte
$\varepsilon_A$	[-]	Fehler Messquerschnitt
$\varepsilon_B$	[-]	Fehler Verdrängungseffekt
$\varepsilon_E$	[-]	Fehler Sondenfaktor
$\varepsilon_g$	[-]	Fehler Geschwindigkeitsgradient
$\varepsilon_t$	[-]	Fehler Turbulenzeinfluss
$\varepsilon_z$	[-]	Fehler Messpunktzahl
$\varepsilon_\beta$	[-]	Fehler Schräganströmung
$\varepsilon_\zeta$	[-]	Fehler Druckabfall, Sondenkopf
$\zeta$	[-]	Widerstandsbeiwert
$\eta$	[-]	Gesamtwirkungsgrad/ Impulsumsetzungs- koeffizient des Strahlventilators
$\lambda$	[-]	Rohrreibungszahl
$\mu = \frac{t_{10}}{t_{90}}$	[-]	Quotient der Zeitprozentwerte für 10% und 90% (Zeitprozentkennwertmethode)
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Lokale Luftdichte
$\rho_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenzdichte für Standschub
$\frac{\sigma_A}{A}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Messquerschnitt
$\frac{\sigma_B}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Verdrängungseffekt
$\frac{\sigma_E}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Sondenfaktor
$\frac{\sigma_f}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Durchflussschwankung
$\frac{\sigma_g}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Geschwindigkeitsgradient
$\frac{\sigma_I}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Integration
$\frac{\sigma_t}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Turbulenzeinfluss
$\frac{\sigma_v}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung für örtliche Geschwindigkeit
$\frac{\sigma_{v1}}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Randzonenkorrektur
$\frac{\sigma_y}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Messpunkteinstellung
$\frac{\sigma_z}{qV}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Messpunktzahl
$\frac{\sigma_\beta}{v}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Schräganströmung

$\frac{\sigma_{\Delta p}}{\Delta p}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Differenzdruck
$\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\nu}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Kompressibilität
$\frac{\sigma_{\zeta}}{\nu}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Druckabfall, Sondenkopf
$\frac{\sigma_{\rho}}{\rho}$	[-]	Rel. Standardabweichung zu Folge Luftdichte
$\tau_{10;50;90}$	[-]	Zeitprozentkennwert nach SCHWARZE
$\varphi = p_a/p_a'$	[-]	relative Feuchte

### Operatoren und Bezeichnungen

$\sum$	Summe
$\Delta$	Differenz zweier Größen

### Weitere Indices und Abkürzungen

1	Messebene 1
2	Messebene 2
3	Messebene 3
3D	dreidimensional
A	Österreich
A11	Karawankenautobahn (A)
A02	Südautobahn (A)
ASTRA	Bundesamt für Straßen (CH)
AUT	Österreich
BuS	Betriebs- und Sicherheitstechnik
CFD	Computational Fluid Dynamics / numerische Strömungsmechanik
CHR	Chien, Hrones & Reswick
CO	Kohlenmonoxid
D	Deutschland
FOK	Fahrbahnoberkante
FR	Fahrtrichtung
FRIK	Frischluftimpulsklappe
FSS	FullScanSpan / Abweichung vom Skalenendwert
IBN	Inbetriebnahme
IBS	Inbetriebsetzung
LG	Längsgeschwindigkeitsmessung
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
NUK	Nordumfahrung Klagenfurt (Streckenabschnitt der A2)
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
P-Regler	Proportional-Regler
RABT	Richtlinien für Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln (D)
RFB	Richtungsfahrbahn
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (A)
SL	Strahllüfter
SLO	Slowenien

STSG	Straßentunnelsicherheitsgesetz (A)
SV	Strahlventilator
TS	Sichttrübung
UFT	Unterflurtrasse
USA	Ultra Sonic Anemometer / Ultraschallanemometer
Z/N	Ziegler / Nichols

In Anlehnung an DIN 1304-1, DIN 1345, DIN 13 345 und ISO 80 0000-5  
Abkürzungen sind in "Times New Roman" geschrieben,  
Formelzeichen sind in „Cambria Math“ geschrieben

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

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

Dipl.-Ing. Gregor Schmölzer

Graz, 14.12.2016

## Kurzfassung

Mit Einführung der [Richtlinie 2004/54/EG, 2004] bzgl. der Mindestanforderungen an die Sicherheit von Straßentunneln und in weiterer Folge mit dem Erlass des österreichischen Straßentunnelsicherheitsgesetzes [STSG, 2013] sind die Ansprüche an die Inbetriebnahme von Tunnellüftungsanlagen stark gestiegen. In der gegenständlichen Arbeit wird daher versucht, für die drei Kernbereiche (Sensorik zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit, Schubeinbringung und Regelung) standardisierbare, einfache, effiziente und praxisnahe Methoden bzw. Ansätze zur sicheren Inbetriebnahme aufzuzeigen.

### Sensorik zur Messung der Längsgeschwindigkeit

Die [RVS 09.02.31, 2014] als gültige Richtlinie schreibt vor, dass durch Referenzmessungen an den installierten Messanlagen sichergestellt wird, dass die einwandfreie Funktionalität gewährleistet ist und die ‚mittlere Strömungsgeschwindigkeit‘ im Fahrraum abgebildet wird. Zudem sollten die installierten Messgeräte nach Öffnung des Tunnels für den Verkehr in regelmäßigen Abständen überprüft werden. Es gibt jedoch keinerlei Vorgaben bzgl. des zu wählenden Referenzmessaufbaus bzw. der anzuwendenden Vorgehensweise. Für technische Strömungen in Luftkanälen ist gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] für solche Fälle eine Netzmessung im betreffenden Querschnitt durchzuführen. Legt man diese Vorgehensweise auf einen Straßentunnel um, resultieren daraus äußerst aufwendige, zeit- und kostenintensive Messungen, die lange Komplettsperren des betroffenen Tunnels erfordern.

Streckenmittelnde Ultraschallsensoren, wie sie auch im Tunnel selbst zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit unter Verkehr eingesetzt werden, können (bei überlegter Wahl des Messspfades) eine sehr gute Alternative zu aufwendigen Messnetzen darstellen. Daher wurden 3 unterschiedliche Messpfadanordnungen für solche Sensoren in den beiden gängigsten Tunnelquerschnittstypen (Kasten-/Rechteck- und Hufeisenprofil) getestet und mit einem errichteten Referenzmessnetz gemäß VDI/VDE verglichen.

Die durchgeführten Messungen zeigen klar, dass streckenmittelnde Ultraschallsensoren prinzipiell sehr gut geeignet sind, aufwändige Netzmessungen mit einer für eine Inbetriebnahme und Referenzierung ausreichenden Genauigkeit adäquat zu ersetzen. Der Messpfad sollte dabei entweder parallel zur Fahrbahn oder doppelt-diagonal so gewählt werden, dass dieser in etwa den Flächenschwerpunkt des Querschnitts schneidet. Für eine erstmalige Referenzmessung im Rahmen einer Neuinbetriebnahme sind zwei gegengleich gekreuzte doppelt-diagonal angeordnete Sensorpaare zu empfehlen, da mit dieser Anordnung Asymmetrien im Strömungsprofil besser erfasst und ausgeglichen werden können.

### Messung des effektiv eingebrachten Schubs

Um die Längsgeschwindigkeit im Tunnel, wie in der [RVS 09.02.31, 2014] gefordert, im Brandfall beeinflussen zu können, müssen mechanische Komponenten zur Einbringung von Impuls / Schub installiert werden. Dies ist immer mit gewissen Verlusten verbunden, welche von mehreren Faktoren abhängen von denen zum Zeitpunkt der Planung jedoch nur einige vollständig bekannt sind. Es müssen daher Annahmen diesbezüglich getroffen werden. Die Messung des effektiv im Tunnel einbringbaren Schubs ist somit unabdingbar, um überprüfen zu können ob der der Planung zu Grunde liegende Schub auch tatsächlich vorhanden ist. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle geforderten Lüftungsziele vollständig und zeitgerecht erreicht werden können. Die Richtlinien sehen eine solche Messung derzeit jedoch noch nicht vor, wodurch es auch keine Vorgaben bzgl. der anzuwendenden Messmethoden gibt.

Ziel war es daher für die beiden in Straßentunneln am häufigsten eingesetzten Systeme (Strahlventilatoren und Impulssysteme nach dem Saccardo-Prinzip) entsprechende Messanordnungen und Auswerteverfahren anzuführen, welche einfach, aber mit ausreichender Genauigkeit, Messung und Berechnung des effektiv eingebrachten Schubs

ermöglichen. Die Ermittlung des effektiv eingebrachten Schubs erfolgt dabei über die Messung der Druckerhöhung im Fahrraum durch die zu untersuchende Komponente, wobei die Reibungsanteile vorab ebenfalls messtechnisch erfasst und im Rahmen der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse zeigen in beiden betrachteten Fällen, dass mit den dargestellten Konzepten mit relativ geringem Aufwand, direkt an der Anlage sehr gute Messergebnisse mit geringen Messunsicherheiten erzielt werden können.

Die Messkonzepte wurden zudem für die gegenständliche Arbeit noch erheblich erweitert, um zusätzlich auch die resultierenden Impulsumsetzungskoeffizienten aus den Messungen bestimmen und mit bereits existierenden Erfahrungs- und Literaturwerten entsprechend vergleichen zu können. Die aus den Messungen gewonnenen Werte stimmen durchwegs gut mit den gefundenen (in der Regel auf CFD-Simulationen basierenden) Literaturwerten überein. Der dafür zusätzlich erforderliche messtechnische Aufwand und die erzielten Messunsicherheiten, die aus der erforderlichen Verkettung zahlreicher Messgrößen resultieren, sind jedoch (im Gegensatz zur reinen Schubmessung) relativ hoch.

#### Ausführung und Inbetriebnahme von Reglern in der Lüftungssteuerung

Kontinuierliche PI- bzw. PID Regler wurden bislang nur selten zur Regelung der Längsgeschwindigkeit im Brandfall eingesetzt, es kamen meist einfache, diskontinuierliche Mehrpunktregler zum Einsatz. PI(D)-Regler können jedoch einige deutliche Vorteile bieten, vorausgesetzt sie sind vorab sorgfältig eingestellt und an die jeweilige Regelstrecke angepasst worden. Derzeit erfolgt die Einstellung in aller Regel nach dem Prinzip ‚trial and error‘, was in vielen Fällen zu schlechten Regelergebnissen führt. In den einschlägigen Richtlinien gibt es diesbezüglich derzeit jedoch noch überhaupt keine Vorgaben.

Ziel war es daher, basierend auf experimentellem Weg durch Aufzeichnung von Sprungantworten, das Übertragungsverhalten einer Tunnellüftungsanlage zu identifizieren und in weiterer Folge passende empirische Einstellregeln („Faustformeln“) aus der Literatur zu finden und anschließend an einer realen Lüftungsanlage vergleichend zu testen, um herauszufinden welche davon ein ansprechendes Regelverhalten und zumeist nur geringen Nachoptimierungsaufwand liefern. Gleichzeitig wurde, speziell für den Fall einer Tunnellüftungsanlage, eine geeignete Reglerstruktur inklusive aller erforderlichen regelungs- und steuerungstechnischen Erweiterungen und Maßnahmen ausgearbeitet und dargestellt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das Übertragungsverhalten mit sehr guter Genauigkeit durch ein  $PT_n$ -Element linearisieren und annähern lässt. Gleichzeitig haben die Vergleichstest ergeben, dass die Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick das beste Regelverhalten liefern. Als geeigneter Regler kommt ein PI-Regler in Parallelstruktur mit Anti-Windup zum Einsatz.

Die gewonnen Erkenntnisse wurden an zwei völlig unterschiedlichen Tunnelanlagen getestet und dokumentiert. Darauf aufbauend wurde ein einfaches Parametrier- und Inbetriebnahmeschema für PI-Regler in der Lüftungssteuerung aufgestellt. Zudem wurden Testabläufe definiert, welche dazu geeignet sind das Regelverhalten objektiv beurteilen, vergleichen und dokumentieren zu können.

Insgesamt konnte somit für jeden der drei untersuchten Kernbereiche einer modernen Tunnellüftungsanlage ein einfacher, standardisierbarer und praxisnaher Ansatz zur Inbetrieb- und Abnahme im Rahmen eines Behördenverfahrens aufgezeigt werden, der einerseits eine korrekte und richtlinienkonforme Funktion gewährleistet und gleichzeitig eine durchgängige und transparente Dokumentation des Prozesses ermöglicht.

## **Abstract**

With the introduction of the EU Directive [Richtlinie 2004/54/EG, 2004] concerning the minimum requirements for the safety of road tunnels and, subsequently, the Austrian Road Safety Act [STSG, 2013], the demands on the commissioning of tunnel ventilation systems have risen sharply. Therefore, the aim of the present work is to demonstrate simple, efficient and practical methods and / or approaches for successful commissioning of the three key factors of a ventilation system, i.e. accurateness of air flow sensors, thrust efficiency of fans and setting of the controller.

### Commissioning of sensors for measuring the longitudinal air velocity

Following the current Austrian guideline [RVS 09.02.31, 2014], the commissioning has to ensure faultless functionality of the installed measuring systems and that the measured velocity represents the mean velocity over the cross section of the tunnel.

In addition, the installed measuring devices should be inspected at regular intervals after opening the tunnel for traffic. However, there are no prescriptions regarding the reference measurement setup to be selected or the procedure to be used.

According to the guideline [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991], for checking technical flows in air ducts a measuring grid should be used. If this approach is applied to road tunnels, this results in complex and time-consuming measurements, which require the affected tunnels to be shut for any traffic or work completely for long periods.

Ultrasonic sensors, which are commonly used in tunnels for measuring the flow velocity under traffic, can be a very good alternative to complex measuring grids (with correct choice of the measurement path). Therefore, 3 different measuring path arrangements for such sensors were tested in the two most common tunnel cross-section types, rectangle and horseshoe profile, and compared to a measuring grid according to VDI / VDE as reference.

The results clearly show that ultrasonic anemometers can be a good alternative to measuring grids with sufficient accuracy for commissioning. The measurement path should either be selected parallel to the roadway or double-diagonal, so that it intersects roughly the centroid of the cross-section. For reference measurements during commissioning, the usage of two mutually cross-coupled pairs of diagonally arranged sensor pairs is recommended, since asymmetries in the flow profile can be better detected and compensated with this arrangement.

### Measurement of thrust efficiency

In order to be able to influence the longitudinal velocity in the tunnel in case of a fire, as required in the Austrian guideline [RVS 09.02.31, 2014], mechanical components (e.g. fans) must be installed. Their thrust efficiency depends on several factors, but only a few are fully known during design stage of the ventilation system. The measurement of thrust efficiency in the tunnel is thus indispensable in order to be able to check whether the assumptions that have been made for the design were correct or not. This is the only way to ensure that all required ventilation objectives can be achieved completely in the given time. Current directives and guidelines do not yet require such measurements.

The aim was to provide measuring concepts including appropriate evaluation methods for systems commonly used in road tunnels (e.g. jet fans, saccardo nozzles,...), which enable a relatively simple determination of the thrust efficiency by measuring the pressure rise in the tunnel. Friction losses are measured in advance and are taken into account for evaluation.

The results show, for both examined system types, that very good results can be obtained using the presented concepts with relatively little effort and low uncertainties.

Additionally, the measuring concepts were extended in order to allow a determination of the efficiency coefficients and a comparison with existing values in literature. The values obtained from the measurements agree well with available literature values (generally based on CFD simulations). However, the additional effort and the resulting uncertainties are considerably. It has to be questioned if these additional measurements are really necessary for determination of the effective thrust available in the tunnel during commissioning.

#### Design, setting and commissioning of controllers in ventilation control

So far, usually simple, discontinuous multi-point controllers have been used for control of the longitudinal ventilation in case of a fire. The implementation of more complex controllers, like PI or PID, is still not widely used. However, PI (D) controllers can offer some significant advantages, provided they have been tuned carefully to the system for which they are applied. Currently, the adjustment is generally based on "trial and error", which is time-consuming and often leads to poor control accuracy. Moreover, no guidelines or documents concerning requirements for designing and testing of controllers exist.

First of all a suitable controller structure, customized for tunnel ventilation control, was developed, including all extensions and add-ons necessary for universal applicability. The next step was to identify the transmission behavior of a tunnel based on an experimental method by recording step responses, and to find suitable empirical setting / tuning rules in the literature. Subsequently the derived setting rules were tested against a real ventilation system in order to find out which one provides an appealing control behavior with little need for optimisation.

The investigations have shown that a PI controller in parallel structure with an adequate anti-windup should be used. The transmission behavior of a tunnel ventilation system can be linearized and approximated by a PT<sub>n</sub> element with very good accuracy. The comparative tests showed that the setting rules according to Chien, Hrones and Reswick provide the best initial control behavior.

The findings of the investigations were tested in two completely different tunnel systems. Based on this, a simple parameterisation and commissioning scheme for PI controllers in ventilation control was set up. In addition, test sequences for an objective evaluation and documentation of the control behavior were defined

Overall, a simple, standardized and practical approach for commissioning purposes could be presented for each of the three investigated key parts of a modern tunnel ventilation system in line with current guidelines permitting a transparent documentation for the authorities.



# 1 Einleitung und Problemstellung

Lange Zeit war die Hauptaufgabe einer Tunnelbelüftung, im Betriebsfall ausreichend Frischluft (Zuluft) in den Tunnel bzw. (abhängig von Verkehrsaufkommen und Länge des Tunnels) gleichzeitig verbrauchte Luft (Abluft) aus dem Tunnel zu transportieren. Planung und Ausführung der Anlagen war damit in erster Linie davon geprägt, die Schadstoffkonzentration (CO, NO<sub>x</sub>) möglichst niedrig zu halten und ausreichend gute Sichtverhältnisse (Rußpartikel, Staub,...) zu schaffen. Eine Absaugung bzw. Austreibung von entstehenden Rauchgasen im Brandfall war zwar vorgesehen, stellte aber in der Regel nicht die Hauptaufgabe dar.

Dies änderte sich nachdem es am 24.03.1999 in Folge eines Unfalles zu einem verheerenden Brandereignis im 11,6 km langen französisch-italienischen Mont-Blanc-Tunnel kam bei dem 39 Menschen ums Leben gekommen sind. Nur etwas mehr als 2 Monate später, am 29.05.1999, war es der 6,4 km lange Tauerntunnel in Salzburg, bei dem es, ebenfalls nach einem Unfall, zu einem Brand gekommen ist, bei dem 12 Menschen getötet und 42 verletzt wurden. In beiden Fällen führten die extrem hohen Brandlasten zusätzlich zu massiven Bauwerksschäden, die lange Sperren dieser sensiblen Streckenabschnitte erforderlich machten.

Im Falle des Mont-Blanc-Tunnels waren Sicherheitskonzept und -ausrüstung (und somit auch Lüftungskonzept und -anlage) zum Zeitpunkt der Katastrophe 34 Jahre, beim 10 Jahre ‚jüngeren‘ Tauerntunnel immerhin schon 24 Jahre alt. Durch diese beiden sowohl örtlich als auch zeitlich sehr nahe beieinander liegenden Ereignissen kam es - zuerst in den betroffenen Ländern, in weiterer Folge in ganz Europa - zu heftigen Diskussionen über die Sicherheit von Tunnelbauwerken, insbesondere von einröhrigen Straßentunneln.

Die Folge war ein komplettes Umdenken bezüglich der Belüftungsphilosophie und -strategie. Die Entrauchung des Bauwerks und dessen Fluchtwege rückten in den Mittelpunkt. Statt wie bisher bei Querlüftungen Luft möglichst gleichverteilt über die gesamte Tunnellänge zu- bzw. abzuführen, sollte zukünftig im Brandfall eine gezielte, konzentrierte Absaugung von Rauchgasen erfolgen, die Zuströmung zur Absaugstelle sollte aktiv beeinflusst werden können. Die nach dem Brand erforderliche Sperre des Tauerntunnels wurde dazu genutzt, das Lüftungssystem dementsprechend bestmöglich zu adaptieren, in weiterer Folge wurden auch in nahezu allen anderen österreichischen Straßentunneln entsprechende Umbauten vorgenommen.

Im Jahr 2004 wurde, ebenfalls als Reaktion auf die genannten Ereignisse, vom Europäischen Parlament eine Richtlinie [Richtlinie 2004/54/EG, 2004] bezüglich der Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz verabschiedet, welche im Mai 2006 in Form des Straßentunnel-Sicherheitsgesetzes [STSG, 2013] vom österreichischen Parlament in nationales Recht umgesetzt wurde.

Die nationalen Richtlinien bezüglich Konzeption und Ausführung von Lüftungsanlagen in Österreich [RVS 09.02.31, 2014], Deutschland [RABT, 2006], Frankreich und der Schweiz [ASTRA 13 001, 2008] wurden dementsprechend überarbeitet und massiv erweitert. Darin werden zahlreiche, zum Teil neue und höhere Anforderungen an Tunnellüftungsanlagen und deren Steuerung / Regelung gestellt. Das zwischenzeitlich 2010 und 2013 novellierte Straßentunnelsicherheitsgesetz [STSG, 2013] sieht zudem nun sehr umfangreiche Genehmigungsverfahren für Planung (§7) und Inbetriebnahme (§8) von neuen oder generalsanierten Tunnelanlagen vor.

Sowohl die strengeren und ausführlicheren Richtlinien als auch die vereinheitlichten Behördenverfahren, welche ein Tunnelprojekt nun von Projektanfang bis zur Verkehrsfreigabe begleiten, sollen dazu führen, dass Planung und Inbetriebnahme von

sicherheitstechnischen Einrichtungen im Tunnel, wie z.B. einer Lüftungsanlage, den geforderten technischen Mindeststandard bzw. den Stand der Technik sicherstellen. Dadurch sind der Aufwand für bzw. die Anforderungen an die Inbetriebnahme solcher Anlagen, insbesondere der Tunnellüftung, innerhalb weniger Jahre extrem gestiegen. Gleichzeitig hat sich die Zeitspanne, die für Bau und Inbetriebnahme zur Verfügung steht nicht verlängert bzw. wird in vielen Fällen sogar versucht diese Zeitspanne gezielt zu verkürzen. Im modernen Verkehrsmanagement stehen Parameter wie z.B. Streckenverfügbarkeit an oberster Stelle, was insbesondere bei der Sanierung von Tunneln an neuralgischen Punkten ohne adäquate Ausweichroute zum kritischen Punkt wird. Oftmals sind Arbeiten zur Inbetriebnahme nur unter Teil- oder Nachtsperren möglich, was bei der Vielzahl an unterschiedlichen Gewerken und Anlagenteilen unweigerlich zu gegenseitigen Blockaden führt. Da für Tests am Gesamtwerk Lüftung immer zahlreiche, voll funktionsfähige und bereits vorab getestete Einzelkomponenten erforderlich sind, können diese Arbeiten in den meisten Fällen erst zu einem sehr späten Zeitpunkt während der Inbetriebnahmephase durchgeführt werden.

Um die mittlerweile hohen Anforderungen, bei tendenziell immer komplexer werdenden Anlagen, noch erfüllen und gleichzeitig den umfangreichen und strengen Behördenverfahren gerecht werden zu können, sind daher zum Teil neue, vor allem aber möglichst standardisierte, transparente, effektive und zielgerichtete Vorgehensweisen zur Inbetriebnahme von Tunnellüftungsanlagen und deren Komponenten notwendig.

Basierend auf zahlreichen durchgeführten Inbetriebnahmen an Tunnellüftungsanlagen unterschiedlichster Ausführung werden in den nachfolgenden Kapiteln Abläufe aufgezeigt, die eine einwandfreie Funktion aller wesentlichen Anlagenkomponenten sowie deren reibungsfreies Zusammenspiel garantieren.

Ziel jeder modernen Tunnellüftungsanlage ist es, unabhängig vom vorliegenden System, die Ausbreitung des bei einem Brand entstehenden Rauchs so rasch und gut wie möglich zu begrenzen und in weiterer Folge gezielt aus dem Tunnel zu transportieren. Währenddessen sollen so lange wie möglich ausreichend gute Sichtbedingungen für flüchtende Personen auf beiden Seiten des Brandortes aufrechterhalten werden.

Bei längsgelüfteten Tunnelanlagen wird der Rauch dazu mit einer kontrollierten Geschwindigkeit über eines der beiden Tunnelportale ausgetrieben, wobei eine eventuell vorhandene Schichtung der Rauchgase erhalten bleiben soll, um die Sicht- und Fluchtbedingungen nicht unnötig zu verschlechtern.

Bei quergelüfteten Systemen oder Anlagen mit Punktabsaugung werden die Rauchgase konzentriert über steuerbare Abluftklappen in unmittelbarer Nähe zum Brand- und somit Entstehungsort abgesaugt. Die Strömungsverhältnisse im Tunnel werden dabei so eingestellt, dass Luft von beiden Seiten zur Absaugstelle strömt und die geöffnete Abluftklappe nicht überströmt wird. Dadurch wird die Rauchausbreitung im Tunnel in der Regel auf ein Minimum beschränkt.

Um diese seitens der Richtlinien geforderten Lüftungsziele so schnell wie möglich erreichen und anschließend auch über längere Zeit halten zu können, sind im Grunde genommen drei Anlagenkomponenten wesentlich:

- Sensoren zur Messung der Luftgeschwindigkeit an mehreren Stellen im Tunnel.
- Mechanische Lüftungselemente zur gezielten Beeinflussung der Strömungsverhältnisse.
- ein Regler, der abhängig von der gemessenen Luftgeschwindigkeit die Strahlventilatoren bzw. die Impulssysteme reguliert.

Die Geschwindigkeitsmessgeräte stellen die ‚Augen‘ der Tunnellüftung dar, ohne diese Sensorik wäre sie de facto blind und eine Regelung nicht möglich. Die Rauchausbreitung und die Sichtbedingungen hängen direkt mit den vorherrschenden Strömungsbedingungen im Tunnel zusammen, weshalb besonders hohe Anforderungen an diese Messungen bezüglich ihrer Qualität gestellt werden müssen. Die Richtlinie fordert, dass die installierten Messgeräte die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelfahrraum abbilden. Auf Grund des sich ausbildenden Strömungsprofils und der beschränkten Möglichkeit zur Situierung der Messgeräte (eine Montage ist nur außerhalb des Lichtraumprofils möglich) ist daher in jedem Fall im Rahmen der Inbetriebnahme eine Überprüfung und Referenzierung mit zuverlässigen, unabhängigen und standardisierten Messverfahren notwendig.

Um die Strömung im Bedarfsfall überhaupt entsprechend beeinflussen zu können muss Kraft auf die Luftsäule im Tunnel ausgeübt werden können. Dies erfolgt durch entsprechende Einbringung von Schub, in den meisten Fällen durch Strahlventilatoren bzw. in manchen Fällen durch sogenannte Impulssysteme. Diese bilden in gewisser Weise das ‚Herz‘ des Lüftungssystems, welches Luft durch den Tunnel ‚pumpt‘. In der Planung einer Tunnellüftungsanlage wird dabei von einem Mindestschub des jeweiligen Systems ausgegangen, welcher effektiv in den Tunnel eingebracht werden kann. Da dieser effektiv einbringbare Schub in der Planungsphase in aller Regel nicht bekannt ist, müssen hier Annahmen auf Basis von Erfahrungswerten, in komplizierteren Fällen auch auf Basis von Simulationen, getroffen werden. Nach Fertigstellung des Lüftungssystems muss daher immer überprüft werden, ob der in der Planungsphase angenommene, effektiv in den Tunnel einbringbare Schub auch tatsächlich an der realen Anlage umsetzbar und verfügbar ist. Andernfalls kann es unter Umständen sein, dass die seitens der Richtlinie geforderten Lüftungsziele nicht oder nur teilweise erreicht werden können.

Die ‚Augen‘ liefern die benötigten Informationen bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, das ‚Herz‘ besitzt die erforderliche Kraft, um diese gegebenenfalls entsprechend beeinflussen zu können. Es fehlt allerdings noch eine Einrichtung, die die von den ‚Augen‘ gelieferten Informationen entsprechend verarbeitet und daraus den Schubbedarf, welchen das ‚Herz‘ aufzubringen hat, ableitet. Diese Einrichtung stellt der Regler dar, eine Art ‚Gehirn‘ der Tunnellüftungsanlage. Der Regler beginnt unmittelbar nach Detektion eines Brandes damit, die aktuelle IST-Geschwindigkeit mit dem geforderten SOLL-Wert zu vergleichen und daraus die vorhandene Regelabweichung zu ermitteln. Abhängig von Größe und Dauer der Regelabweichung wird mehr oder weniger Schub angefordert, um die Strömung entsprechend beschleunigen bzw. im Bedarfsfall auch abbremsen zu können. PI(D)-Regler bieten hier gegenüber den bislang meistens im Bereich der Tunnellüftung zum Einsatz kommenden Schwellertschaltungen (eine einfache Form des Mehrpunktreglers) einige erhebliche Vorteile, vorausgesetzt, der Regler wurde sorgfältig auf die Regelstrecke abgestimmt und angepasst. Meistens erfolgt im Zuge der Inbetriebnahme die Parametrierung derzeit jedoch noch auf dem Prinzip ‚trial and error‘, was einerseits zeitaufwendig ist und andererseits, so zeigt die Praxis, immer wieder zu schlecht eingestellten Reglern führt. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass ungünstig eingestellte PI(D)-Regler oft schlechtere Regelergebnisse liefern als einfache, sauber parametrierte Schwellertschaltungen.

Für die drei hier kurz umrissenen, wesentlichen Bereiche einer Tunnellüftung (‚Augen‘, ‚Herz‘ und ‚Gehirn‘) sollen in der gegenständlichen Arbeit einfache, praxisnahe Möglichkeiten für eine zusehends standardisierte, transparente und zielgerichtete Inbetriebnahme erarbeitet und dargestellt werden.

Jedem der drei Bereiche ist ein eigenes Kapitel gewidmet in dem auf die jeweilige Problem- und Aufgabenstellung genau eingegangen wird:

Kapitel 2 beschäftigt sich mit Vergleichsmessungen zwischen Netzmessungen gemäß

[VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] als Referenz und unterschiedlichen Konstellationen streckenmittelnder Ultraschallanemometer in den beiden Hauptformen von Tunnelquerschnitten (Rechteck- und Hufeisenprofil). Ziel ist es herauszufinden, welches Strömungsprofil sich in den untersuchten Querschnitten tatsächlich ausprägt und wie der Messaufbau mit streckenmittelnden Ultraschallmessgeräten aussehen muss, um damit die ‚mittlere‘ Strömungsgeschwindigkeit im Profil abbilden zu können, um die zeit- und kostenintensiven Netzmessungen zukünftig entsprechend adäquat ersetzen zu können.

In Kapitel 3 werden für die beiden häufigsten Formen der Schubeinbringung (Strahlventilatoren und Impulssysteme) einfache Messanordnungen aufgezeigt, mit denen der effektiv eingebrachte Schub dieser Systeme ermittelt werden kann. In weiterer Folge werden daraus die sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten für das jeweilige System ermittelt und, sofern vorhanden, mit Werten aus der Literatur bzw. vorangegangener Studien verglichen. Die auf diese Weise ermittelten Werte können für zukünftige Projekte als verbesserte Planungswerte herangezogen und die Planungsunsicherheit bzw. zu berücksichtigende Reserven entsprechend reduziert werden.

Kapitel 4 widmet sich der Implementierung und Parametrierung von PI-Reglern in der Lüftungssteuerung. Es wurden 2 bekannte Verfahren (Wendetangentenverfahren und Zeitprozentkennwertmethode) zur experimentellen Streckenidentifikation an realen Lüftungsanlagen angewendet, um auf Basis der aufgezeichneten Sprungantworten die Kenngrößen der Regelstrecke zu ermitteln und in weiterer Folge eine Erstparametrierung durchführen zu können. Für die Erstparametrierung wurden 6 aus der Regelungstechnik bekannte ‚Faustformelverfahren‘ (empirische Einstellregeln) bezüglich ihres Führungs- und Störverhaltens an einer realen Tunnellüftungsanlage getestet und die Ergebnisse verglichen, um herauszufinden welche dieser Regeln am besten für die Anforderungen an die Regelung einer Lüftungsanlage geeignet sind. Zusätzlich wurden steuerungstechnische Maßnahmen entwickelt und getestet, welche eine Umsetzung eines PI-Reglers an nahezu allen gängigen Lüftungsanlagentypen ermöglichen sollte. Abschließend wurde aus den erzielten Ergebnissen ein Inbetriebnahme und Parametrierschema für PI-Regler in der Lüftungssteuerung abgeleitet.

## 2 Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

### 2.1 Allgemeines

Neben dem Brandmeldekabel, welches einen Brand überhaupt erst detektiert und die Örtlichkeit des Ereignisses festlegt, stellt die Messung der Luftgeschwindigkeit in Längsrichtung das zentrale Element der Lüftungssteuerung im Brandfall dar.

Die vorherrschende Strömungsrichtung sowie der Absolutwert der mittleren Luftgeschwindigkeit im Querschnitt sind, in Verbindung mit dem Brandort jene Parameter, die für die Regelung der Lüftung im Brandfall ausschlaggebend sind. Während des weiteren Ereignisverlaufs erfolgt ein permanenter Abgleich der IST-Geschwindigkeit mit den vorgegebenen SOLL-Werten. Diese Abweichung wiederum ist die einzige Eingangsgröße für den Regler, das Herzstück der Lüftungssteuerung.

Ohne Geschwindigkeitsmessung ist eine Steuerung des Lüftungssystems, völlig unabhängig von der Art und Komplexität des Systems, de facto ‚blind‘ und nur äußerst beschränkt einsatzfähig.

Da es für die Steuerung und Regelung der Lüftung keine Alternativen zur Geschwindigkeitsmessung gibt, müssen relativ hohe Ansprüche an die Messgeräte, deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit gestellt werden.

Im Rahmen der Inbetriebnahme einer Tunnellüftungsanlage muss daher eine entsprechend sorgfältige Überprüfung und Abnahme der im Tunnel installierten Geschwindigkeitsmessgeräte erfolgen. Aus steuerungstechnischen Gründen werden mehrere voneinander unabhängige Messstellen über die Länge des Tunnels verteilt angebracht.

Um eine ununterbrochene, möglichst unbeeinflusste Messung (auch unter Verkehr bzw. bei Stau) sicherstellen zu können, erfolgt die Montage der Messgeräte meist oberhalb des Lichtraumprofils in einer Höhe von ca. 4700 mm über der Fahrbahn.

Gemäß den österreichischen Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen [RVS 09.02.31, 2014] ist im Rahmen der Inbetriebnahme für jede dieser Messanordnungen der Nachweis zu erbringen, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt abgebildet wird. Gleichzeitig ist zu überprüfen ob montagebedingte oder lokale Störungen der Messgeräte vorliegen, welche das Messergebnis relevant beeinflussen. Weder in der österreichischen Richtlinie für die Dimensionierung von Lüftungsanlagen [RVS 09.02.31, 2014] noch in jener für die betriebs- und sicherheitstechnischen (BuS) Ausstattung [RVS 09.02.22, 2014] gibt es jedoch Vorgaben bzgl. eines dafür zu wählenden Messaufbaus bzw. einer anzuwendenden Vorgehensweise..

Auch in den einschlägigen, nationalen Richtlinien benachbarter Länder (Deutschland, Schweiz) gibt es diesbezüglich keinerlei Angaben. Einzig in der Schweiz wurde eine vergleichende Langzeitstudie mit mehreren unterschiedlichen Messgerätetypen in 2 unter Betrieb stehenden Tunneln durchgeführt [Grässlin, Nodirolo, & Drost, 2013] um unterschiedliche Messprinzipien (Straudruck, Ultraschalllaufzeitdifferenz) und Messanordnungen (Punktmessung, Streckenmittelung) hinsichtlich Zuverlässigkeit, Stabilität und Genauigkeit untersucht und daraus grobe Empfehlungen bzgl. Planung, Inbetriebnahme und Betrieb solcher Messgeräte abgeleitet.

### 2.2 Aufgabenstellung/Ziel der Messungen

Die einschlägigen Normen und Richtlinien sehen, für die Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bei technischen Strömungen in Kanälen, Netzmessungen über den gesamten Querschnitt vor [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991].

Diese Messverfahren sind, insbesondere für Rechteck- und Kreis- bzw. Kreisringquerschnitte, in der allgemeinen Lüftungstechnik anerkannt und als Standard definiert. Sie ermöglichen eine, bei für den jeweiligen Querschnitt korrekter Aufteilung der Messpunkte, sehr genaue Bestimmung der mittleren Luftgeschwindigkeit.

Die einschlägigen Tunnelrichtlinien in Österreich, Deutschland und der Schweiz machen jedoch keinerlei Angaben darüber, welche Messanordnungen gewählt bzw. wie die Referenzierungsmessungen selbst durchzuführen sind, es wird lediglich gefordert dass der Nachweis zu erbringen ist dass die installierten Messsysteme die ‚mittlere‘ Geschwindigkeit im Fahrraum abbilden.

Für technische Strömungen in Rohrsystemen gibt es dafür standardisierte und genormte Verfahren die in [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] genau beschrieben werden. Die dort dargestellten sogenannten ‚Netzmessungen‘ ermöglichen eine relativ genaue Messung der ‚mittleren‘ Geschwindigkeit im betroffenen Querschnitt.

Will man diese Verfahren bzw. deren Anwendung aber auf die Strömung in einem Straßentunnel übertragen, ergeben sich dabei jedoch einige Problemstellungen:

In einem Tunnel kann oft keine, über längere Zeiträume, konstante Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden, da diese durch nicht steuerbare äußere Größen (Wind, Portaldrücke, ...) beeinflusst wird. Vereinfachte Verfahren, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Punkten des Querschnitts zeitlich nacheinander gemessen wird und welche gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] zulässig sind, scheinen dadurch auf Grund der (auch bei Installation einer permanenten Hintergrundmessung) vorhandenen Unsicherheiten wenig praktikabel.

Um die Geschwindigkeit in allen erforderlichen Querschnittspunkten gleichzeitig messen zu können ist der Aufbau eines Messnetzes mit einer großen Anzahl an Sonden erforderlich. Für übliche Querschnittsflächen zwischen 46 und 72 m<sup>2</sup>, in manchen Fällen sogar deutlich über 100 m<sup>2</sup>) sind im günstigsten Fall, den anerkannten Standardverfahren gem. [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] folgend, abhängig von der Gleichförmigkeit des vorliegenden Geschwindigkeitsprofils und der Querschnittsform, zwischen 16 und 36, im ungünstigsten Fall sogar bis zu 100 Messpunkte erforderlich. Auf- und Abbau sowie die Durchführung der Messungen selbst benötigen viel Zeit.

Während des Auf- und Abbaus ist die betroffene Tunnelröhre für Stunden nicht durchfahrbar, wodurch bei der Inbetriebnahme von Neubauten die Anlage für andere Tests und Arbeiten für diesen Zeitraum nicht zur Verfügung steht. Bei Messungen in Bestandsanlagen bzw. Sanierungen unter Betrieb werden dadurch entsprechend lange Tunnelsperren erforderlich.

Solche Verfahren sind somit insgesamt sehr aufwendig und damit auch zeit- und kostenintensiv.

Für Abnahmemessungen im Rahmen von Inbetriebnahmen bzw. auch für die empfohlene, regelmäßige Überprüfung und Referenzierung bereits im Betrieb befindlicher Tunnelanlagen gibt es diesbezüglich in den einschlägigen nationalen Richtlinien keine Vorgaben, es wäre jedoch äußerst wünschenswert alternative Messverfahren zu den angeführten, sehr aufwändigen Netzmessungen finden zu können die ähnliche genaue Ergebnisse liefern, aber mit deutlich geringerem Aufwand verbunden sind.

Da Punktmessungen (ob Einzel- oder Mehrpunktverfahren) immer Kenntnisse über die Geschwindigkeitsverteilung voraussetzen und deren Auswertung dadurch immer mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind, können Methoden mit linearer Streckenmittelung eine brauchbare Alternative darstellen.

Die Lage der Mess- (und somit Mittelungs-) strecke muss dabei so angeordnet werden, dass

die gemessene, mittlere Geschwindigkeit im Messpfad mit genügender Genauigkeit der tatsächlich vorherrschenden, mittleren Geschwindigkeit im jeweiligen Tunnelquerschnitt entspricht.

Um herauszufinden welche Anordnungen des Messpfades prinzipiell dazu geeignet sind, werden Vergleichsmessungen zwischen drei unterschiedlichen Konfigurationen streckenmittlerer Messgeräte und einer der Norm entsprechenden Referenzmessung (einem Messnetz gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991]) durchgeführt. Die Messungen erfolgen für mehrere, unterschiedliche (für den späteren Betrieb eines Tunnels relevante) Geschwindigkeitsstufen.

#### Die Ziele der durchgeführten Messungen im Detail::

- Aufbau von Messnetzen in den zwei Grundtypen von Tunnelquerschnitten (Kasten-/Rechteckprofil und Hufeisenprofil)
- Paralleler Aufbau von Begleitmessungen, basierend auf streckengemittelten Ultraschallanemometern, in folgenden Konfigurationen:
  - *über dem Lichtraumprofil (4700 mm über Fahrbahn / FOK)*
  - *auf Höhe der horizontalen Tunnelachse (2280 mm über Fahrbahn / FOK)*
  - *kreuzweise und doppelt-diagonal (4100 mm auf 200 mm über Fahrbahn / FOK)*
- Durchführung von Vergleichsmessungen im Messaufbau für 5 unterschiedliche, für den Lüftungsbetrieb in Tunneln relevanten Geschwindigkeitsstufen je Querschnittstyp
- Aufzeichnung von bewusst durch aktive Strahlventilatoren beeinflussten Geschwindigkeitsprofilen
- Auswertung und Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt auf Basis der durchgeführten Netzmessungen
- Grafische Darstellung der aufgezeichneten Geschwindigkeitsverteilungen (Isotachenfelder)
- Gegenüberstellung / Bewertung und Vergleich der Begleitmessungen mit der Netzmessung

## 2.3 Netzmessungen in Tunnelquerschnitten

### 2.3.1 Messaufbau und Messprogramm

#### 2.3.1.1 Messaufbau

##### 2.3.1.1.1 Kasten-/ Rechteckprofil

Die Messungen für einen Tunnel mit Rechteck- oder Kastenprofil wurden in der RFB Italien der Unterflurtrasse (UFT) Lendorf, welche Teil der Nordumfahrung Klagenfurt (NUK) auf der A2 Südautobahn ist, durchgeführt. Tabelle 2-1 zeigt einen Übersicht der wesentlichen Anlagenparameter der Richtungsfahrbahn (RFB) Italien UFT Lendorf.

Tabelle 2-1: Übersicht geometrische Parameter, UFT Lendorf / RFB Italien

Geometrische Parameter, UFT Lendorf / RFB Italien			
Tunnellänge gesamt	$L$	$[m]$	800
Längsneigung	$s$	$[\%]$	-1,44% auf 361 m
			+2,30% auf 439 m
Regelquerschnitt	$A$	$[m^2]$	47,53
Umfang	$U$	$[m]$	28,65
Hydraulischer Durchmesser	$D_H$	$[m]$	6,64
Anzahl Fahrspuren	-	$[-]$	2

Abbildung 2-1 zeigt eine schematische Darstellung der UFT Lendorf sowie der darin installierten Lüftungsanlage:

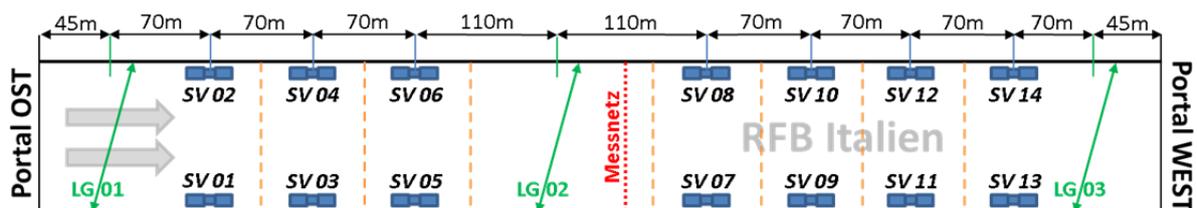


Abbildung 2-1: schematische Darstellung der UFT Lendorf / RFB Italien

Die RFB Italien der UFT Lendorf verfügt über insgesamt 14 Strahlventilatoren (SV 01 bis SV 14, technische Daten siehe Tabelle 2-2) welche paarweise in den oberen Ecken des Profils situiert sind, sowie über insgesamt 3 fest installierte Längsgeschwindigkeitsmessungen (LG 01 bis LG 03, technische Daten siehe Kapitel 2.3.1.2), wovon zwei im Bereich der beiden Portale und eines im Bereich der Tunnelmitte montiert sind.

Zusätzlich verfügen die 14 Strahlventilatoren auf Grund der sehr ungünstigen Einbausituation über Strahlablenkbleche, welche den Luftstrahl sowohl von der Tunnelwand als auch –decke ablenken sollen, um die Schubverluste so gering wie möglich zu halten. Dadurch wird zwar der Einbaufaktor verbessert, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch die Montage dieser Strahlablenker der Standschub gemäß Datenblatt um ca. 4 bis 5 % reduziert wird.

Tabelle 2-2: technische Daten Strahlventilatoren gem. Datenblatt, UFT Lendorf

Technische Daten Strahlventilator Howden APR-630/280-8 (ohne Strahlablenker)			
Stand Schub	$S$	$[N]$	440
Referenzdichte	$\rho_0$	$[kg/m^3]$	1,2
Außendurchmesser	$D_A$	$[mm]$	630
Laufreddurchmesser	$D_I$	$[mm]$	790
Ausblasgeschwindigkeit	$v_a$	$[m/s]$	35,1
Motorleistung	$P$	$[kW]$	15,0
Drehzahl	$n$	$[1/min]$	2910

Das Messnetz wurde ca. 430 m vom Einfahrts-/Ostportal, etwas nach der Tunnelmitte, errichtet. Der Abstand zu den benachbarten Strahlventilatorpaaren SV 05/06 und SV 07/08 betrug ca. 175 bzw. 45 m. Zusätzlich zu den Druckdifferenzen  $\Delta p_{1-32}$  an den 32 Staudrucksonden wurde im Bereich des Messnetzes auch noch der Absolutdruck  $p_{abs}$  und die Lufttemperatur  $t_{Luft}$  zur Bestimmung der Luftdichte während der Versuche aufgezeichnet.

Die Austeilung der Staudrucksonden des Messnetzes erfolgte gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] für das Verfahren nach Log.-Tschebyschew in Rechteckquerschnitten (siehe Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3).

Bei diesem Verfahren kann, so wie beim Log.-Linear Verfahren, auf eine nachträgliche Randzonenkorrektur verzichtet werden, da diese bereits in der Aufteilung der Messpunkte berücksichtigt ist. Zudem sind die Wandabstände und die dadurch entstehenden Teilflächen so gewählt, dass die mittlere Geschwindigkeit im untersuchten Querschnitt dem arithmetischen Mittelwert aller an den Messpunkten gemessenen Geschwindigkeiten entspricht.

Dadurch braucht im Rahmen der Auswertung auch keine Flächengewichtung der gemessenen Geschwindigkeiten durchgeführt werden.

Zusätzlich erlaubt das Verfahren nach Log.-Tschebyschew für Rechteckquerschnitte die Einteilung der beiden Achsen (horizontal und vertikal) unterschiedlich zu wählen.

Um ein möglichst dichtes Messnetz zu erhalten, wurde daher ein Netz mit 7 vertikalen Achsen ( $n_V = 7$ ) und 5 horizontalen Achsen ( $n_H = 5$ ) gewählt. Die Achsabstände wurden mit den Faktoren  $h_i/H$  bzw.  $b_i/B$  (normierte Achsabstände) aus der [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] (siehe auch Tabelle 2-3) errechnet ( $h_i$  bzw.  $b_i$  ist dabei der Achsabstand der Messgerade mit dem Index  $i$  zur jeweiligen Mittelachse,  $H$  bzw.  $B$  die Höhe bzw. Breite des Rechtecks in dem das Messnetz errichtet werden soll).

Tabelle 2-3: norm. Achsabstände  $h_i/H$  bzw.  $b_i/H$ , Log.-Tschebyschew f. Rechteckquerschnitte [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983]

$n / i$	1	2	3	4
5	0	$\pm 0,212$	$\pm 0,426$	-
6	$\pm 0,063$	$\pm 0,265$	$\pm 0,439$	-
7	0	$\pm 0,134$	$\pm 0,297$	$\pm 0,447$

Dabei steht ‚n‘ für die Anzahl der gewählten Messgeraden, ‚i‘ stellt den Index des jeweiligen

Messpunktes dar. Bei einer ungeraden Anzahl an gewählten Messgeraden fallen die Messgerade mit dem Index 1 und die jeweilige Mittelachse zusammen.

Die Breite des untersuchten Querschnitts beträgt 9,5 m, die Höhe 5,05 m. Daraus können mit den Werten aus Tabelle 2-3 die Achsabstände in vertikaler und horizontaler Richtung für das Messnetz errechnet werden (Tabelle 2-4):

Tabelle 2-4: errechnete Achsabstände  $h_i$  und  $b_i$ , UFT Lendorf

$n / i$	1	2	3	4
$n_H=7$	0	$\pm 1,27$ m	$\pm 2,82$ m	$\pm 4,25$ m
$n_V=5$	0	$\pm 1,07$ m	$\pm 2,15$ m	-

Da sowohl horizontal als auch vertikal eine ungerade Anzahl an Messgeraden gewählt wurde, fallen in beiden Fällen die Messgeraden mit dem Index 1 mit der jeweiligen Mittelachse zusammen, die errechneten Abstände betragen daher 0 m.

Die resultierende Aufteilung der Sonden im Messquerschnitt kann Abbildung 2-2 entnommen werden. Da jedoch insgesamt nur 32 Sonden für die vorgesehenen 35 Messpunkte zur Verfügung standen, sind 3 Messpunkte unbesetzt geblieben (rot eingezeichnete Messpunkte ohne Sondennummer).

Der Querschnitt stellt, wie aus Abbildung 2-2 ersichtlich wird, auf Grund der Querneigung des Tunnels kein exaktes Rechteck, sondern streng genommen ein Parallelogramm dar. Der Winkel ist mit etwas über 2 Grad jedoch so gering, dass der Querschnitt für alle weiteren Betrachtungen in erster Näherung als Rechteck betrachtet wurde.

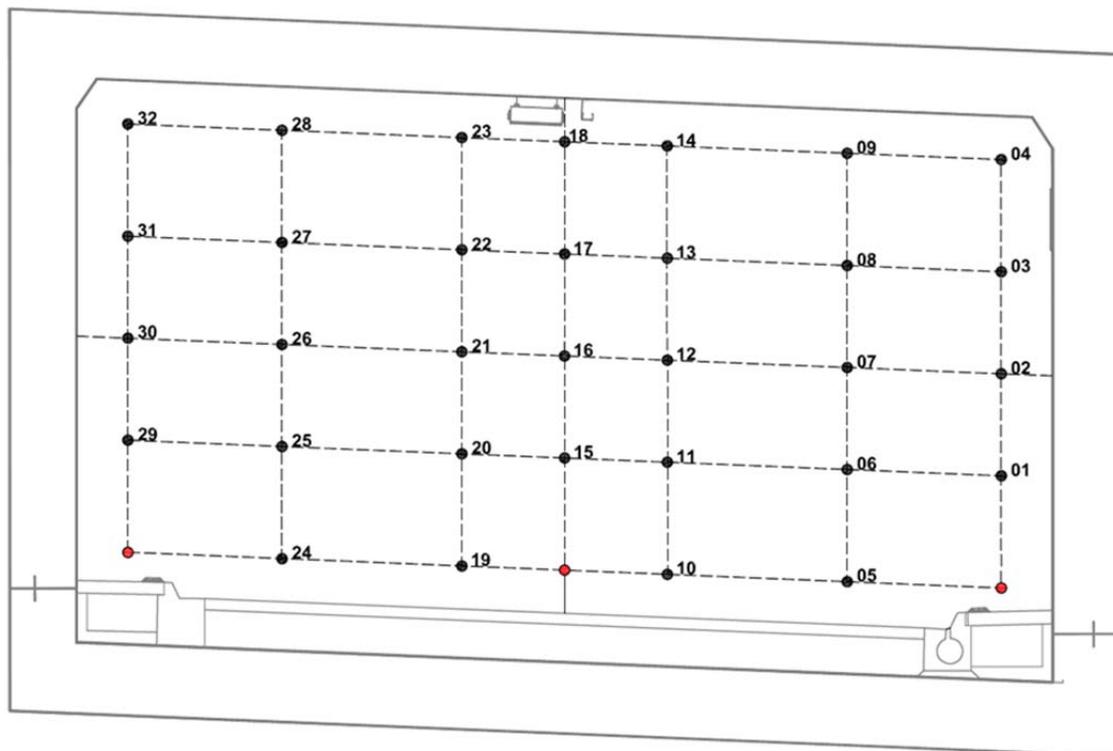


Abbildung 2-2: Aufteilung der Messsonden, UFT Lendorf

Das Trägernetz wurde aus Holzstaffeln mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm errichtet, welche an der Tunneldecke mit Metallwinkeln und Schrauben befestigt und am Boden, um die Fahrbahn nicht zu beschädigen, mit Hilfe von Holzkeilen gegen Verrutschen gesichert wurden.. Insgesamt wurden 6 vertikale Träger aufgebaut, welche parallel zu den Tunnelwänden (also lotrecht) mit Hilfe einer Wasserwaage positioniert wurden.

Die Stirnfläche der Trägerkonstruktion betrug insgesamt 1,498 m<sup>2</sup>, dies entspricht einer Versperrung des Messquerschnitts von ca. 3%. Die Beeinflussung der Messung durch das Messgitter kann daher als vernachlässigbar bezeichnet werden.

Die Befestigung der Sonden am Trägernetz erfolgte mit Gewindestangen und eigens dafür angefertigten Befestigungsplatten. Um die mittlere, vertikale Sondenreihe ohne zusätzlichen Steher befestigen zu können, wurden die Gewindestangen entsprechend verlängert. Damit die Sonden auf Grund des längeren Hebelarms während den Messungen nicht zu schwingen beginnen, wurden diese zusätzlich im Bereich des Sondenkörpers an einem von der Kabeltasse abgehängten Drahtseil befestigt.

Die Signalkabel der einzelnen Sonden wurden an den Holzstaffeln nach unten geführt, mit Gewebeklebeband gesichert und auf der Fahrbahn zusammengeführt.

Abschließend wurden die Wand- bzw. Messpunktabstände vermessen und überprüft, sowie die Sonden im Messquerschnitt mit einer Wasserwaage und einem Maßband ausgerichtet.

Das vollständig errichtete Messnetz im Tunnelquerschnitt ist in Abbildung 2-3 dargestellt.



Abbildung 2-3: Ansicht des aufgebauten Messnetzes, UFT Lendorf

Zusätzlich zur bereits vorhandenen, fest installierten Geschwindigkeitsmessung LG 02 (einfach-diagonal auf einer Höhe von ca. 4700 mm über Fahrbahnoberkante FOK) wurden noch drei weitere Begleitmessungen (ebenfalls streckenmittelnde Ultraschallanemometer / USA) aufgebaut welche in weiterer Folge als FVT 01 bis 03 bezeichnet werden.

Die Messgeräte FVT 01 und 02 wurden doppelt-diagonal und kreuzweise auf einer Höhe von 100 mm bzw. 4100 mm über FOK, Messgerät FVT 03 wurde einfach-diagonal auf einer Höhe von 2280 mm über FOK (entspricht in etwa der Mittelachse des Profils) aufgebaut.

Ein Detailschema des Messaufbaus kann Abbildung 2-4 entnommen werden:

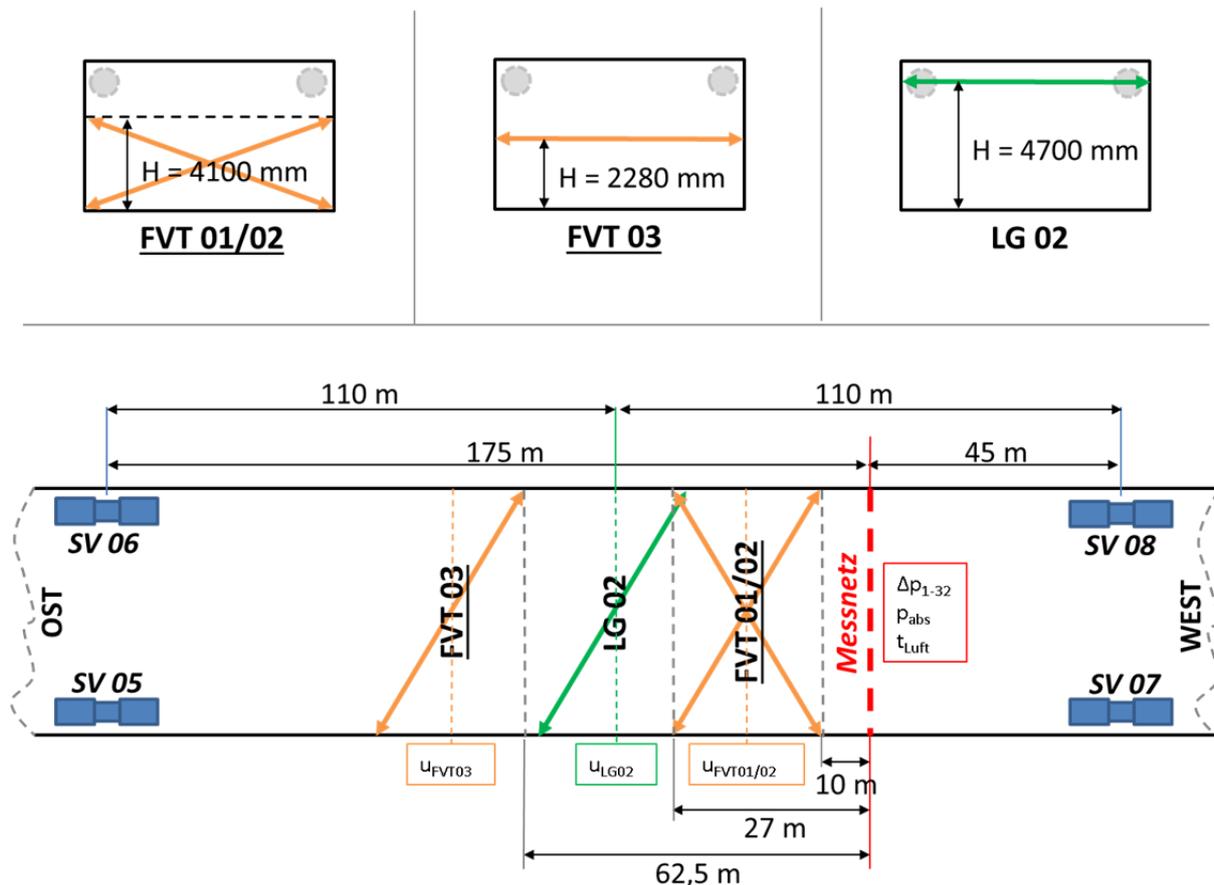


Abbildung 2-4: Detailschema Messaufbau, UFT Lendorf

### 2.3.1.1.2 Hufeisenprofil

Neben den Messungen im Rechteckprofil wurden auch Messungen in einem Tunnel mit klassischem Hufeisenprofil durchgeführt. Dies erfolgte in der RFB Italien des Tunnels Falkenberg, welcher ebenfalls Teil der Nordumfahrung Klagenfurt (NUK) ist und auf der A2 Südautobahn liegt, durchgeführt. Tabelle 2-5 beinhaltet alle relevanten Anlagenparameter der Richtungsfahrbahn Italien des Tunnels Falkenberg.

Tabelle 2-5: Übersicht geometrische Parameter, Tunnel Falkenberg / RFB Italien

Geometrische Parameter, Tunnel Falkenberg / RFB Italien			
Tunnellänge gesamt	$L$	$[m]$	1090
Längsneigung	$s$	$[\%]$	+1,30%
Regelquerschnitt	$A$	$[m^2]$	52,2
Umfang	$U$	$[m]$	27,9
Hydraulischer Durchmesser	$D_H$	$[m]$	7,48
Anzahl Fahrspuren	-	$[-]$	2

Abbildung 2-5 zeigt eine schematische Darstellung des Tunnels Falkenberg sowie der darin installierten Lüftungsanlage:

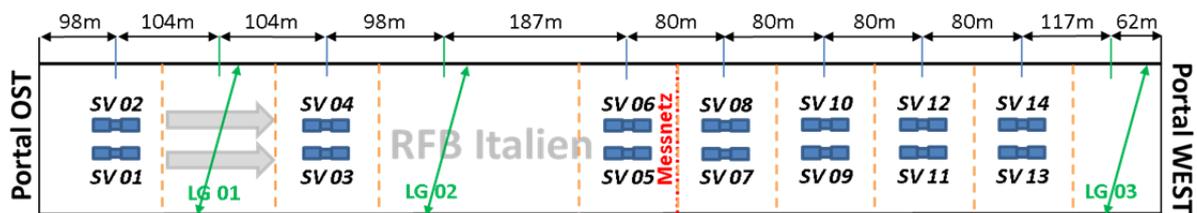


Abbildung 2-5: schematische Darstellung Tunnel Falkenberg

Die RFB Italien des Tunnels Falkenberg verfügt über insgesamt 14 Strahlventilatoren (SV 01 bis SV 14, technische Daten siehe Tabelle 2-6) welche paarweise unter der Firne des Profils situiert sind, sowie über insgesamt 3 fest installierte Längsgeschwindigkeitsmessungen (LG 01 bis LG 03, technische Daten siehe Kapitel 2.3.1.2), wovon zwei im Bereich der beiden Portale und eines im Bereich der Tunnelmitte montiert sind.

Tabelle 2-6: technische Daten Strahlventilatoren gem. Datenblatt, Tunnel Falkenberg

Technische Daten Strahlventilator Howden APR-1000/403-6			
Stand Schub	$S$	$[N]$	620
Referenzdichte	$\rho_0$	$[kg/m^3]$	1,2
Außendurchmesser	$D_A$	$[mm]$	1210
Laufreddurchmesser	$D_f$	$[mm]$	1000
Ausblasgeschwindigkeit	$v$	$[m/s]$	29,6
Motorleistung	$P$	$[kW]$	15,0
Drehzahl	$n$	$[1/min]$	1460

Das Messnetz mit den Staudrucksonden wurde ca. 651 m vom Einfahrts-/Ostportal, etwas nach der Tunnelmitte, errichtet. Der Abstand zu den benachbarten Strahlventilatorpaaren SV 05/06 und SV 07/08 betrug jeweils 40 m. Zusätzlich zu den Druckdifferenzen  $\Delta p_{1-32}$  an den 32 Staudrucksonden wurde im Bereich des Messnetzes auch noch der Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$  und die Lufttemperatur  $t_{\text{Luft}}$  zur Bestimmung der Luftdichte während der Versuche aufgezeichnet.

Im Gegensatz zum Rechteck- oder Kastenprofil entspricht ein Hufeisenprofil eigentlich keinem in den einschlägigen Normen angeführten Querschnittstypen, für die es standardisierte oder vereinfachte Verfahren gibt.

Im Grunde genommen kann ein Hufeisenprofil als ein Halbkreis mit einem trapezförmigen Sockel angenähert werden. Für Abnahmemessungen in Kreis- und Kreisringquerschnitten wird gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] und [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] ausschließlich das Schwerlinienverfahren empfohlen. Aus diesem Grund erfolgte auch für das vorliegende Hufeisenprofil die Austeilung der Sonden des Messnetzes gemäß den Vorgaben der [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] für das Schwerlinienverfahren.

Die Messpunktausteilung ist so gewählt, dass die entstehenden Teilflächen alle gleich groß sind, was (ähnlich wie beim Log.-Tschebyschew Verfahren) dazu führt, dass die mittlere Geschwindigkeit im untersuchten Querschnitt dem arithmetischen Mittelwert aller an den Messpunkten gemessenen Geschwindigkeiten entspricht. Die Messpunkte liegen dabei auf den Schwerlinien der einzelnen Teilkreisflächen.

Auf Grund der verfügbaren Anzahl an Sonden und um ein möglichst dichtes Messpunktenetz zu erhalten, wurde die Zahl  $n$  der Messpunkte je Messradius mit 5 festgelegt. Die Wandabstände wurden mit der Beziehung (2-1) aus der [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] errechnet:

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot i - 1}{2 \cdot n}} \right) \quad (2-1)$$

$y_i$	Wandabstand des Messpunkts	in [m]
$D$	Durchmesser des Kreisquerschnittes	in [m]
$i$	Index des Messpunktes, <b>i=1 bis 5</b>	in [-]
$n$	Gewählte Anzahl Messpunkte je Messradius, <b>n=5</b>	in [-]

Die Radien zur Berechnung der Teilflächensegmente wurden ebenfalls auf Basis der [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] ermittelt:

$$\frac{R_i}{R} = \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \quad (2-2)$$

$R_i$	Radius der Teilkreisfläche $i$	in [m]
$R$	Radius der gesamten Messfläche	in [m]

Daraus ergeben sich für die gewählte Anzahl  $n=5$  an Messpunkten je Messradius folgende dimensionslose Wandabstände bzw. Radien:

Tabelle 2-7: dimensionslose Wandabstände / Teilkreisradien, Schwerlinienverfahren bei Kreisflächen gem. [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983]

$n=5 / i$	1	2	3	4	5
$y_i / D = y_i / 2R$	0,0257	0,0817	0,1464	0,2261	0,3419
$R_i / R$	0,8944	0,7746	0,6325	0,4472	0,0000

Der Radius des Tunnelgewölbes beträgt für den Tunnel Falkenberg 4,83 m. Damit können die effektiven Radien  $r_i$  ( $=R-y_i$ ) auf denen die Messpunkte liegen sowie die Radien der zugehörigen Teilkreisflächen  $R_i$  errechnet werden:

Tabelle 2-8: errechnete Messpunkt- und Teilkreisradien für  $n=5$ , Tunnel Falkenberg

$n=5 / i$ ( $R=4,83 \text{ m}$ )	1	2	3	4	5
$r_i = R - y_i$	4,5821 m	4,0411 m	3,4153 m	2,6455 m	1,5274 m
$R_i$	4,3201 m	3,7413 m	3,0548 m	2,1600 m	0,0000 m

Da die Gleichförmigkeit der Geschwindigkeitsverteilung im vorliegenden Tunnelquerschnitt nicht bekannt war, wurde der Empfehlung der [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] folgend, die Anzahl der Messradien von  $\varphi = 90$  bzw. 45 Grad auf  $\varphi = 30$  Grad erhöht.

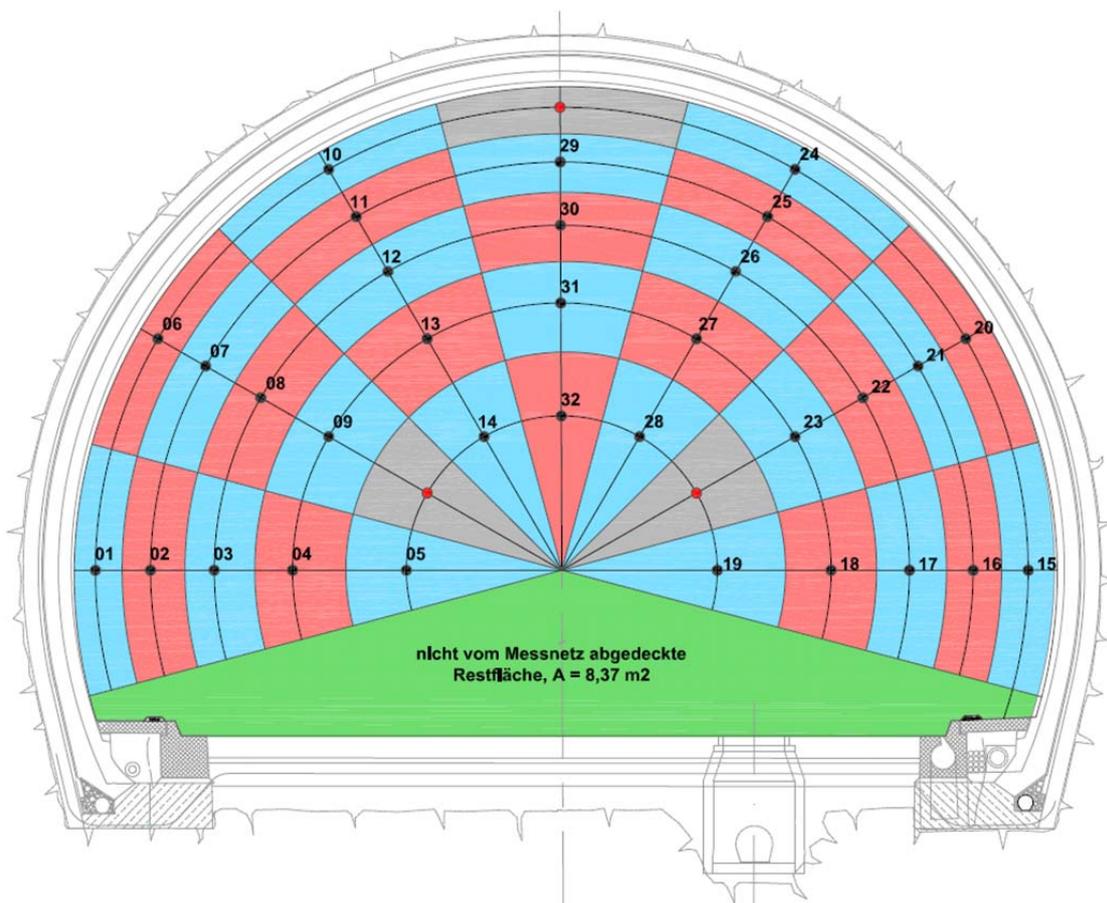


Abbildung 2-6: Aufteilung der Messsonden, Tunnel Falkenberg

Die resultierende Aufteilung der Sonden im Messquerschnitt kann Abbildung 2-6 entnommen werden. Da nur 32 Sonden für die vorgesehenen 35 Messpunkte zur Verfügung standen, blieben 3 Messpunkte unbesetzt (rot eingezeichnete Messpunkte ohne Sondennummer bzw. graue Teilflächen).

Zudem wird aus Abbildung 2-6 ersichtlich, dass darüber hinaus, auf Grund der Geometrie des Tunnelquerschnitts und der gewählten Sondausteilung, eine annähernd dreieckige Restfläche von ca.  $8,37 \text{ m}^2$  (entspricht ca. 16% des Gesamtquerschnitts) im unteren Bereich nicht vom Messnetz abgedeckt wird. Dieser Umstand muss in den Auswertungen entsprechend Berücksichtigung finden, damit dadurch die mittlere Geschwindigkeit nicht beeinflusst wird.

Das Trägernetz wurde, analog zum Rechteck-/Kastenprofil, aus Holzstaffeln mit den Abmessungen  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  errichtet, welche an der Tunnelfirste bzw. den Ulmen mit Metallwinkeln und Schrauben befestigt und am Boden mit Hilfe von Holzkeilen gegen Verrutschen gesichert wurden, um die Fahrbahn nicht zu beschädigen. Es wurde ein horizontaler (Höhe über der Fahrbahn ca.  $1,4 \text{ m}$ ) und insgesamt 5 radial angeordnete Träger (Winkel zueinander jeweils  $30 \text{ Grad}$ ) angeordnet. Die Stirnfläche der Trägerkonstruktion betrug in Summe  $2,00 \text{ m}^2$ , dies entspricht einer Versperrung des Messquerschnitts von ca. 3,86%. Bei diesem Wert kann eine negative Beeinträchtigung der Messung nahezu ausgeschlossen werden.

Die Befestigung der Sonden am Trägernetz erfolgte mit Gewindestangen und eigens dafür angefertigten Befestigungsplatten. Die Signalkabel der einzelnen Sonden wurden an den Holzstaffeln nach innen zum Zentrum des Netzes geführt, mit Gewebeklebeband gesichert und auf der Fahrbahn gebündelt.

Die Wand- bzw. Messpunktabstände wurden abschließend vermessen und überprüft, die Sonden im Messquerschnitt mit einer kurzen Wasserwaage und einem Maßband abschließend ausgerichtet. Das vollständig errichtete Messnetz ist in Abbildung 2-7 dargestellt.



Abbildung 2-7: Ansicht des aufgebauten Messnetzes, Tunnel Falkenberg

Neben der bereits vorhandenen, fest installierten Geschwindigkeitsmessung LG 02 (einfach-diagonal, ca. 4700 mm über Fahrbahnoberkante FOK) wurden noch zusätzlich drei Begleitmessungen (ebenfalls streckenmittelnde Ultraschallanemometer) aufgebaut welche in weiterer Folge als FVT 01 bis 03 bezeichnet werden. Die Messgeräte FVT 01 und 02 wurden doppelt-diagonal und kreuzweise auf einer Höhe von 100 mm bzw. 4100 mm über FOK, Messgerät FVT 03 wurde einfach-diagonal auf einer Höhe von 2280 mm über FOK (entspricht in etwa der Mittelachse des Profils) aufgebaut

Ein Detailschema des Messaufbaus kann Abbildung 2-8 entnommen werden:

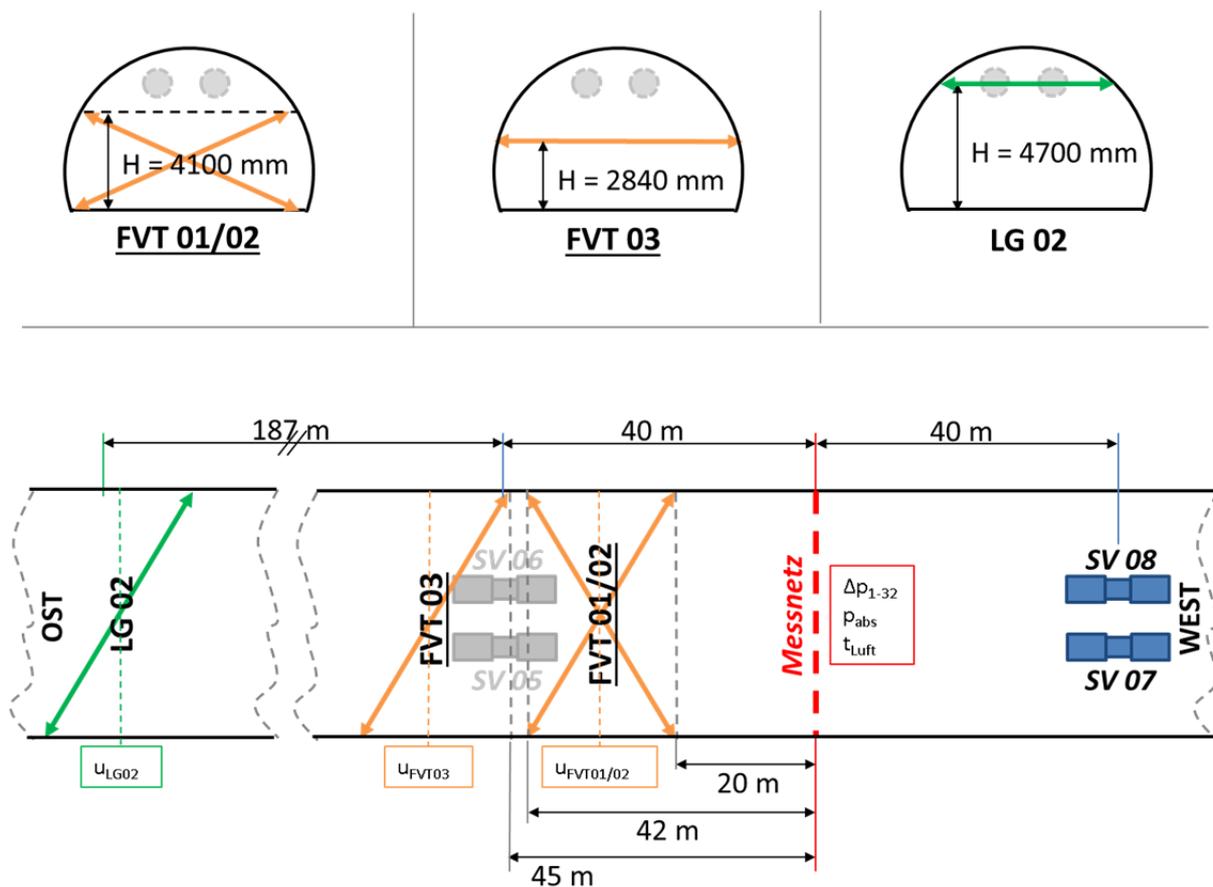


Abbildung 2-8: Detailschema Messaufbau, Tunnel Falkenberg

### 2.3.1.2 Messgeräte

Die für die Messungen verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 2-9 aufgelistet. Zudem finden sich in dieser Tabelle deren Messbereiche und die zu erwartenden Messunsicherheiten wieder.

Bei den für die Messwerte  $u_{FVT01}$  bis  $u_{FVT03}$  sowie den Messwert  $u_{LG02}$  (fix im Tunnel installierte Geschwindigkeitsmessung) eingesetzten Messgeräten handelt es sich um streckenmittelnde Ultraschallanemometer vom Typ DURAG D-FL 210T.

Diese besitzen eine vom Hersteller angegebene Messunsicherheit im typischen Messbereich (-20 bis +20 m/s) von  $\pm 0,2$  m/s. Die beiden Messköpfe der Messstelle  $u_{LG02}$  sind mit Hilfe entsprechender schwenk- und neigbarer Konsolen direkt an den Tunnelwänden (UFT Lendorf) bzw. im oberen Bereich der beiden Ulmen (Tunnel Falkenberg) installiert und waren zum Zeitpunkt der Messungen erst wenige Wochen alt. Die Messstelle wurde knapp vor

Durchführung der gegenständlichen Messungen über den gesamten relevanten Geschwindigkeitsbereich vom Lieferanten überprüft und referenziert.

Die drei zusätzlichen Messstellen  $u_{FVT01}$  bis  $u_{FVT03}$  wurden auf Stativen bzw. mobilen Bodenplatten mit Gewicht montiert. Winkel und Abstand in Längsrichtung wurden mit Hilfe eines Rollmaßes ermittelt und mehrfach überprüft, und die Lage der Sensorköpfe zueinander mit einem eigens dafür angefertigten Laserkopf aufeinander ausgerichtet. Die Messpfadlänge (Abstand der Sensormembranen zueinander), welche im Messgerät selbst hinterlegt werden muss und direkt in die interne Berechnung des Geschwindigkeitsmesswerts einfließt, wurde mit Hilfe eines Abstandslasermessgeräts gemessen. Die insgesamt gewählte Vorgehensweise entspricht den Vorgaben des Herstellers.

Der Gerätetyp wird vom Hersteller als ‚wartungsarm‘ bezeichnet und es wird lediglich eine regelmäßige Sichtprüfung auf erkennbare Beschädigungen der außenliegenden Schallmembrane empfohlen. Weitergehende Überprüfungen sind seitens des Herstellers eigentlich nicht vorgesehen. An den zur Durchführung der gegenständlichen Messung verwendeten Messgeräten werden jedoch in regelmäßigen Abständen internen Vergleichsmessungen (Vergleich mehrerer Messgeräte zueinander) und in größeren Abständen einer Überprüfung im Windkanal des Instituts für Strömungslehre und Wärmeübertragung (ISW) der TU Graz unterzogen. Es ist daher davon auszugehen dass die vom Hersteller angegebene, typische Messgenauigkeit von  $\pm 0,2$  m/s an allen Geräten eingehalten werden kann.

Absolutdruck ( $p_{abs}$ ) und Lufttemperatur ( $t_{LUFT}$ ) während der Messungen (zur Bestimmung der Luftdichte) wurden mit Sensoren der Fa. Kroneis aufgezeichnet, für die Erfassung der Differenzdrücke an den Staudrucksonden des Messnetzes ( $\Delta p_{1-32}$ ) wurden Differenzdruckgeber vom Typ HCLA02X5PB der Fa. FirstSensor, siehe hierzu auch Kapitel 2.3.1.3.1, verwendet.

Tabelle 2-9: Auflistung verwendeter Messgeräte – Netzmessungen im Tunnelquerschnitt

Messwert	Messgröße	Messgerät	Messbereich	Messunsicherheit
$u_{FVT01}$	Geschwindigkeit	DURAG (D-FL 210T)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,2$ m/s
$u_{FVT02}$	Geschwindigkeit	DURAG (D-FL 210T)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,2$ m/s
$u_{FVT03}$	Geschwindigkeit	DURAG (D-FL 210T)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,2$ m/s
$u_{LG02}$	Geschwindigkeit	DURAG (D-FL 210T)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,2$ m/s
$p_{abs}$	Absolutdruck	Kroneis (Barogebner Type 315K)	850 bis 1050 hPa	$\pm 0,5$ hPa
$t_{LUFT}$	Temperatur	Kroneis	-35 bis +45 °C	$\pm 0,15$ °C
$\Delta p_{1-32}$	Differenzdruck	FirstSensor, Typ HCLA02X5PB	-2,5 bis +2,5 mbar	$\pm 0,05\%$ FSS*

\*FSS ... FullScaleSpan (Endwert)

### 2.3.1.3 Staudrucksonden

#### 2.3.1.3.1 Konstruktionsweise der Staudrucksonden

Für die Netzmessungen wurden insgesamt 32 Staudrucksonden angefertigt. Die Sonden bestehen jeweils aus einem zylindrischen Mittelteil mit konischen Übergängen, in denen ein Miniatur-Differenzdrucksensor (technische Spezifikationen siehe Kapitel 2.3.1.2, Tabelle 2-9) eingeklebt ist, und einem zylindrischen Staurohr auf jeder Seite (siehe Abbildung 2-9). Um die Sonden später entsprechend befestigen zu können, wurde ca. 200 mm lange Gewindestange zentral im Schwerpunkt des eigentlichen Sondenkörpers angebracht.

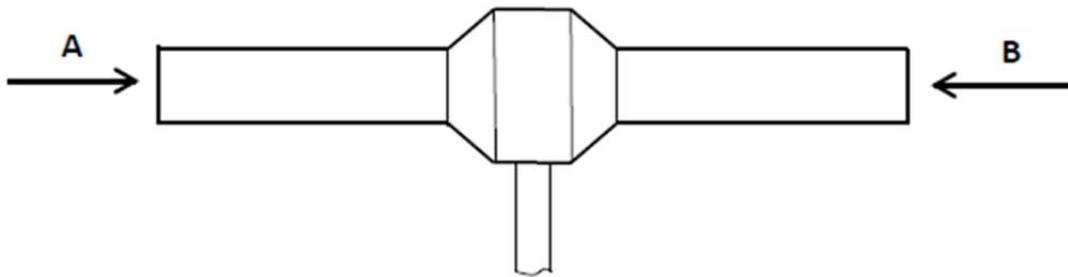


Abbildung 2-9: Skizze Staudrucksonde

Es wird die Differenz zwischen dem anliegenden Staudruck (Totaldruck) auf der Anströmseite und dem Druck auf der Abströmseite ( $\approx$  stat. Druck) gebildet. Dies hat den Vorteil dass eine Messung der Strömungsgeschwindigkeit in beide Richtungen möglich ist, ohne die Sonde drehen zu müssen. Diese Bauart weicht zwar von der klassischen Prandtlsonde ab, da jedoch jede Sonde für den späteren Messbereich im Windkanal inkl. Befestigung kalibriert wurde, stellt dies kein Problem dar.

Zur Differenzdruckbildung an den Sonden wurden sogenannte HCLA Drucksensoren mit verstärktem Ausgang der Fa. FirstSensor (Typ HCLA02X5PB) eingesetzt (technische Spezifikationen siehe Kapitel 2.3.1.2). Diese sind seitens des Herstellers bereits kalibriert, temperaturkompensiert, linearisiert und lageunabhängig.

Der gewählte Messbereich liegt zwischen -2,5 und +2,5 mbar, die Nichtlinearität / Hysterese beträgt typisch kombiniert  $\pm 0,05\%$  FSS (FullScanSpan / Abweichung vom Endwert).

Auf Grund ihrer geringen Baugröße konnten diese Sensoren direkt in den Sondenkörper (siehe Abbildung 2-9) integriert werden.

#### 2.3.1.3.2 Kalibrierung der Staudrucksonden

Da es sich bei den verwendeten Staurohren um eine Eigenkonstruktion handelt, und auf Grund der gewählten Bauweise die gemessene Druckdifferenz (zwischen Anström- und Abströmseite) nicht exakt dem dynamischen Druckanteil entspricht, wurden alle 32 Sonden entsprechend für den relevanten Geschwindigkeitsbereich kalibriert.

##### 2.3.1.3.2.1 Kalibrierungsaufbau

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte im Niedergeschwindigkeitswindkanal des Instituts für Strömungslehre und Wärmeübertragung (ISW) der TU Graz. Bei diesem Windkanal handelt es sich um einen sogenannten ‚geschlossenen Umlaufwindkanal‘ in Göttinger Bauart. Der Kanal verfügt über einen rechteckigen Querschnitt, die verwendete Standarddüse hat eine Fläche von 2,0 x 1,46 m.

Diese erlaubte es, 6 Sonden nebeneinander im Querschnitt des Luftstrahls anzuordnen und

gleichzeitig zu kalibrieren, ohne eine merkbare gegenseitige Beeinflussung zu riskieren.



Abbildung 2-10: Kalibrier Aufbau für Sonden im Windkanal

Die vertikale Ausrichtung der Sonden erfolgte in der Horizontalachse des Kanalquerschnitts, der Abstand der Sensoren zueinander betrug ca. 200 mm (siehe Abbildung 2-10).

### 2.3.1.3.2.2 Kalibriervorgang

Kalibriert wurde für jede Sonde die gesamte Messkette, wie sie auch im Rahmen der durchgeführten Netzmessungen verwendet wurde:

- Sonde (Staurohr) mit Differenzdrucksensor
- Sondenbestigung (Gewindestange)
- Signalkabel
- Analog/Digital-Wandler (DEWE-Rack)
- Datenerfassung und Signalverarbeitung (DASYLab)

Die Kalibrierung erfolgte für einen Geschwindigkeitsbereich von -8 m/s bis +8 m/s, jeweils mit einer Schrittweite von 1,0 m/s im Bereich -6,0 bis +6,0 m/s und einer Schrittweite von 2,0 m/s außerhalb dieses Kernbereichs. Jede Geschwindigkeitsstufe wurde, nach Erreichen eines stationären Zustands, für 3 Minuten gehalten um eine Mittelwertbildung zu ermöglichen.

Dabei wurde der im Windkanal gemessene dynamische Druck, Luftdruck und -temperatur sowie die daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit über die Dauer des Tests aufgezeichnet und gemittelt. Gleichzeitig wurden die von den 6 im Kanal aufgebauten Sonden ausgegebenen Spannungssignale aufgezeichnet.

### 2.3.1.3.2.3 Auswertung der Kalibriermessungen

Nach Abschluss der Kalibriermessungen wurde für jede Sonde für die einzelnen Geschwindigkeitsstufen die mittlere Ausgangsspannung dem im Windkanal gemessenen dynamischen Druck zugeordnet und aus den Datenpaaren (Kalibrierpunkten) rechnerisch die entsprechende Kalibriergerade ermittelt. Exemplarisch ist dies in Abbildung 2-11 (Strömungsrichtung A) und Abbildung 2-12 (Strömungsrichtung B) für Sonde 01 dargestellt.

Dadurch ergibt sich für jede Sonde ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung  $x$  in [mV] und dem dynamischen Druck  $y$  in [Pa] (bezogen auf die gemessene Referenzgeschwindigkeit im Windkanal)

$$y[\text{Pa}] = k_A \cdot x[\text{mV}] + d_A \quad (2-3)$$

$$y[\text{Pa}] = k_B \cdot x[\text{mV}] + d_B \quad (2-4)$$

wobei die Geradengleichung (2-3) mit den Kalibrierfaktoren  $k_A$  und  $d_A$  für positive Anströmung (Strömungsrichtung A, siehe Abbildung 2-9) gilt, Geradengleichung (2-4) mit den Faktoren  $k_B$  und  $d_B$  für negative Geschwindigkeiten (Strömungsrichtung B).

Aus dem dynamischen Druck kann dann, bei bekannter Luftdichte, die Strömungsgeschwindigkeit auf Basis der Beziehung (2-5) errechnet werde.

$$u = \sqrt{\frac{2 p_{dyn}}{\rho}} \quad (2-5)$$

$u$	Luftgeschwindigkeit	in [m/s]
$p_{dyn}$	Gemessener dynamischer Druck an Staudrucksonde	in [Pa]
$\rho$	Lokale Luftdichte	in [kg/m <sup>3</sup> ]

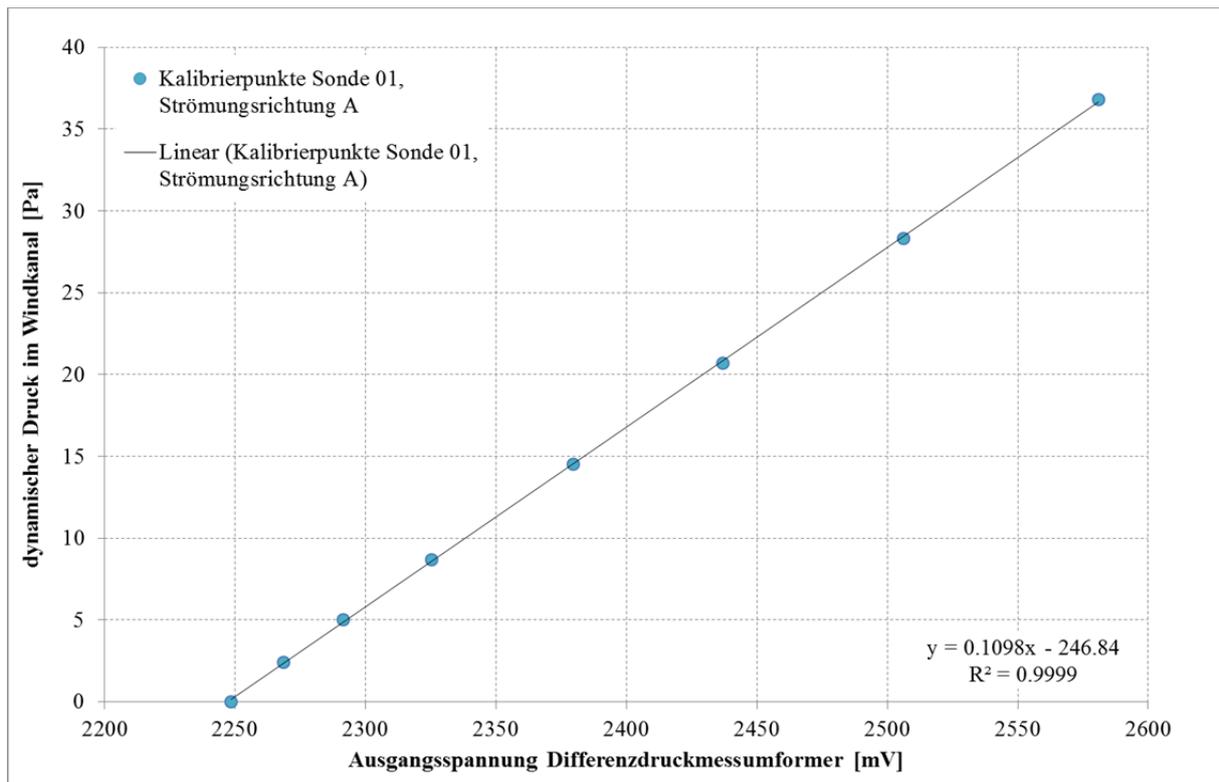


Abbildung 2-11: Kalibrierpunkte Sonde 01, Strömungsrichtung A (positiv)

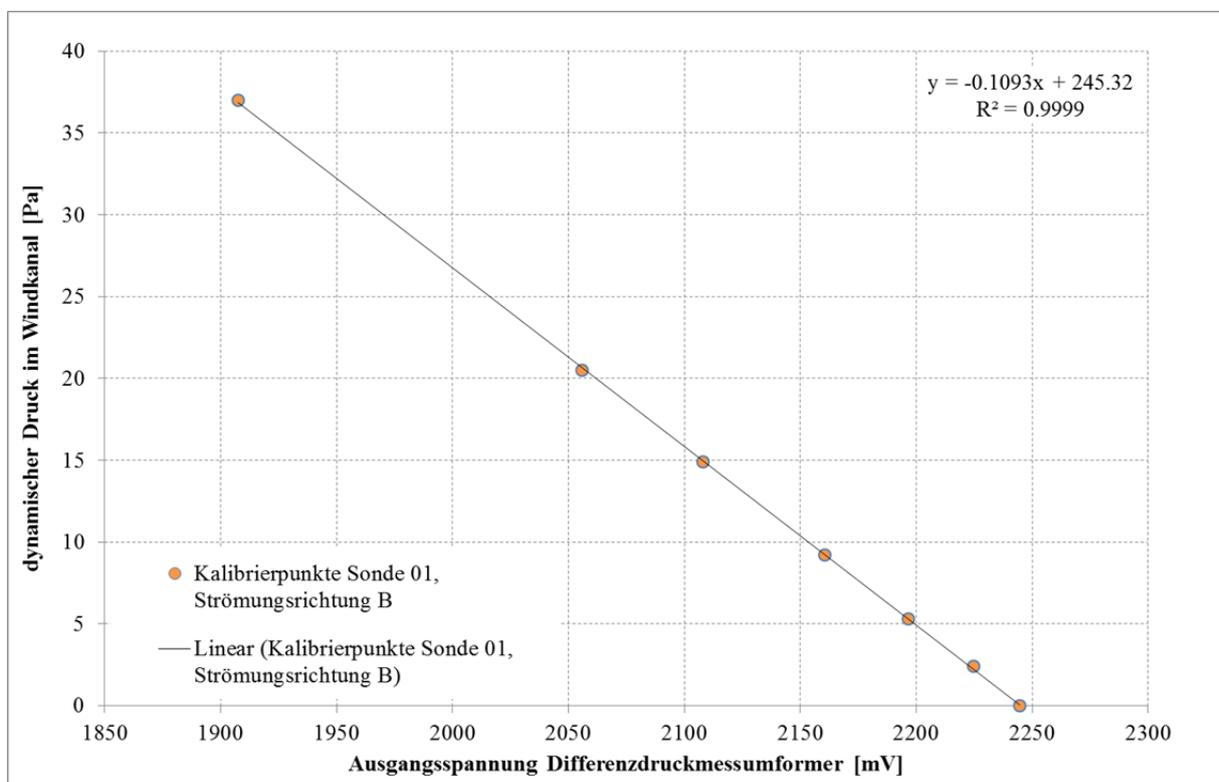


Abbildung 2-12: Kalibrierpunkte Sonde 01, Strömungsrichtung B (negativ)

2.3.1.3.2.4 Zusammenfassung Kalibrierfaktoren

Die ermittelten Kalibrierfaktoren sowie das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) bezüglich Linearität sind für alle 32 Sonden in Tabelle 2-10 zusammengefasst:

Tabelle 2-10: Sonden 01 bis 32, Kalibrierfaktoren für beide Strömungsrichtungen

Sonde / Faktor		01	02	03	04	05	06	07	08
Strömung > A (positiv)	$k_A$	0,1098	0,1085	0,1085	0,1088	0,1089	0,1100	0,1098	0,1085
	$d_A$	-246,6489	-242,7596	-242,7596	-243,3100	-243,0870	-246,7229	-248,2772	-242,7596
	$R^2$	0,9999	0,9998	0,9998	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998
Strömung > B (negativ)	$k_B$	-0,1093	-0,1087	-0,1087	-0,1094	-0,1091	-0,1090	-0,1116	-0,1087
	$d_B$	245,3153	243,3032	243,3032	244,6213	243,6696	244,4516	252,0772	243,3032
	$R^2$	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999
Sonde / Faktor		09	10	11	12	13	14	15	16
Strömung > A (positiv)	$k_A$	0,1100	0,1091	0,1096	0,1091	0,1089	0,1103	0,1083	0,1080
	$d_A$	-246,7054	-244,8066	-244,0491	-246,9772	-245,3882	-248,2672	-245,1221	-243,4867
	$R^2$	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Strömung > B (negativ)	$k_B$	-0,1101	-0,1102	-0,1103	-0,1101	-0,1103	-0,1112	-0,1100	-0,1096
	$d_B$	246,8527	247,3594	245,7020	249,1949	248,4221	250,2950	248,6418	247,2210
	$R^2$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000
Sonde / Faktor		17	18	19	20	21	22	23	24
Strömung > A (positiv)	$k_A$	0,1089	0,1094	0,1092	0,1096	0,1104	0,1112	0,1124	0,1117
	$d_A$	-244,5656	-242,2017	-243,3441	-246,2248	-249,0930	-251,3189	-252,8467	-251,9158
	$R^2$	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000
Strömung > B (negativ)	$k_B$	-0,1103	-0,1112	-0,1103	-0,1108	-0,1113	-0,1110	-0,1118	-0,1115
	$d_B$	247,4958	246,1705	245,6691	248,6590	251,1769	250,7621	251,4451	251,3236
	$R^2$	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Sonde / Faktor		25	26	27	28	29	30	31	32
Strömung > A (positiv)	$k_A$	0,1108	0,1123	0,1100	0,1111	0,1271	0,1122	0,1119	0,1121
	$d_A$	-248,8746	-252,9930	-248,7125	-247,5478	-283,7352	-252,9474	-253,2634	-253,0857
	$R^2$	1,0000	0,9998	1,0000	1,0000	0,9959	1,0000	0,9999	0,9999
Strömung > B (negativ)	$k_B$	-0,1111	-0,1123	-0,1109	-0,1099	-0,1048	-0,1116	-0,1114	-0,1126
	$d_B$	249,4043	252,5404	250,7266	244,8085	229,3029	251,3464	251,9487	254,0837
	$R^2$	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	0,9993	1,0000	0,9999	0,9999

### 2.3.1.4 Messprogramm

#### 2.3.1.4.1 Messreihe im Kasten-/ Rechteckprofil

Mit Hilfe der installierten Strahlventilatoren wurde eine Längsströmung im Tunnel erzeugt. Um möglichst viele unterschiedliche Geschwindigkeitsstufen vermessen zu können, erfolgte die Schaltung der Strahlventilatoren gestaffelt, wobei jede Stufe nach dem Erreichen einer stationären Geschwindigkeit für ca. 10 Minuten gehalten wurde. Dies ermöglicht eine aussagekräftige Mittelwertbildung, Auswirkungen kurzzeitiger Schwankungen oder Störungen auf das Messergebnis können dadurch minimiert werden.

Auf Grund des relativ geringen Standschubs der Strahlventilatoren in der UFT Lendorf erfolgte die Zuschaltung anfangs paarweise, später wurden sogar mehrere Paare gemeinsam aktiviert um eine entsprechende Änderung der Geschwindigkeit von Stufe zu Stufe erzielen zu können. Das Messprogramm mit den gewählten Schaltzuständen ist in Tabelle 2-11 zusammengefasst.

Tabelle 2-11: Messprogramm Kasten-/ Rechteckprofil, UFT Lendorf

Messung	Strömung	Schaltzustand Strahlventilatoren							Mittelungszeit		
		01/ 02	03/ 04	05/ 06	07/ 08	09/ 10	11/ 12	13/ 14	von	bis	Dauer
[ - ]	[ WEST/OST ]	[ 0=AUS / 1=EIN ]							[ hh:mm:ss ]		
1	WEST	1	0	0	0	0	0	0	01:32:00	01:39:00	00:07:00
2	WEST	1	1	0	0	0	0	0	01:43:00	01:52:00	00:09:00
3	WEST	1	1	0	0	0	0	1	01:56:00	02:05:00	00:09:00
4	WEST	1	1	1	0	1	1	1	02:09:00	02:18:00	00:09:00
5	WEST	1	1	1	1	1	1	1	02:21:00	02:30:00	00:09:00
6*	OST	1	1	0	1	0	0	0	02:51:00	03:00:00	00:09:00

\*... Strömungsprofil bei starker Beeinflussung durch Aktivierung der Strahlventilatoren 07/08

Die Messungen 1 bis 5 wurden für eine Strömung in Fahrtrichtung (West) bei mittleren Geschwindigkeiten zwischen 2,0 und 6,0 m/s durchgeführt. Auf Grund der Positionierung des Messnetzes und der Begleitmessungen im Tunnel (siehe hierzu Kapitel 2.3.1.1), kann eine Beeinflussung der Messergebnisse durch aktive Strahlventilatoren bei dieser Strömungsrichtung so gut wie ausgeschlossen werden.

Für Messung 6 hingegen wurde die Strömung umgedreht (Richtung Ost) und das Ventilatorpaar 07/08 aktiviert, welches nur ca. 45 m vom Messnetz entfernt war. Mit dieser Messung soll ein nicht ausgebildetes, gestörtes Geschwindigkeitsprofil aufgezeichnet werden, um daraus Schlüsse bzgl. der Beeinflussung von Geschwindigkeitsmessungen durch Strahlventilatoren ziehen zu können.

### 2.3.1.4.2 Messreihe im Hufeisenprofil

Im Tunnel Falkenberg wurde im Grunde genommen dieselbe Vorgehensweise wie in der UFT Lendorf gewählt.

Auf Grund der Positionierung des Messnetzes und der Begleitmessungen (siehe Kapitel 2.3.1.1.2) durfte das Strahlventilatorpaar 05/06 jedoch nicht zum Aufbau der Längsströmung verwendet werden, da auf Grund der hohen lokalen Geschwindigkeiten neben einer massiven Beeinflussung der Messung auch der Messaufbau selbst gefährdet gewesen wäre.

Das durchgeführte Messprogramm mit den genauen Schaltzuständen der Strahlventilatoren im Tunnel Falkenberg ist in Tabelle 2-12 zusammengefasst.

Tabelle 2-12: Messprogramm Tunnel Hufeisenprofil, Tunnel Falkenberg

Messung	Strömung	aktive Strahlventilatoren							Mittelungszeit		
		01/ 02	03/ 04	05/ 06	07/ 08	09/ 10	11/ 12	13/ 14	von	bis	Dauer
[ - ]	[ WEST/OST ]	[ 0=AUS / 1=EIN ]							[ hh:mm:ss ]		
1	WEST	1	0	X	0	0	0	0	22:15:00	22:25:00	00:10:00
2	WEST	1	1	X	0	0	0	0	22:30:00	22:40:00	00:10:00
3	WEST	1	1	X	0	0	0	1	22:45:00	22:55:00	00:10:00
4	WEST	1	1	X	0	1	1	1	23:00:00	23:10:00	00:10:00
5	WEST	1	1	X	1	1	1	1	23:15:00	23:25:00	00:10:00
6*	OST	1	1	X	1	1	1	1	00:30:00	00:40:00	00:10:00

\*... Strömungsprofil bei starker Beeinflussung durch Aktivierung der Strahlventilatoren 07/08

Analog zu den durchgeführten Messungen im Kastenprofil (UFT Lendorf) wurden die Messungen 1 bis 5 für eine Strömung in Fahrtrichtung (West) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen 2,0 und 6,0 m/s durchgeführt. Da das Strahlventilatorpaar 05/06 nicht aktiviert wurde, kann eine Beeinflussung der Netz- und Begleitmessungen durch aktive Ventilatoren ausgeschlossen werden.

Messung 6 erfolgte, wie bei den Messungen im Kastenprofil, für eine Strömung in Richtung Ost (entgegen der Fahrtrichtung) und das Lüfterpärchen 07/08, welches nur ca. 40 m vom Messnetz entfernt war, wurde aktiviert, um eine Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils zu provozieren.

## 2.3.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren

### 2.3.2.1 Log.-Tschebyschew (Kasten-/ Rechteckprofil)

Das Log.-Tschebyschew-Verfahren zählt gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] zu den vereinfachten Messvorschriften, bei denen sowohl die Randzonenkorrektur als auch die Flächengewichtung der einzelnen Messpunkte bereits implizit mit der Austeilung der Sonden berücksichtigt wird. Die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  beim Log.-Tschebyschew-Verfahren entspricht daher dem arithmetischen Mittelwert aller in den Messpunkten gemessenen Geschwindigkeiten  $v_i$ :

$$v_m = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z v_i \quad (2-6)$$

Von den 35 Teilflächen des Messnetzes konnten 3 Flächen nicht mit Sonden besetzt werden. Den 3 nicht erfassten Flächen (rote Messpunkte in Abbildung 2-2 ohne Sondennummer) wurde jeweils der Mittelwert der beiden benachbarten Segmente zugeordnet. Die aus dieser Annahme resultierende Unsicherheit kann auf Grund des geringen Flächenanteils der 3 Segmente und der Mittelwertbildung aus den unmittelbaren Nachbarpunkten als gering angesehen werden.

### 2.3.2.2 Schwerlinienverfahren (Hufeisenprofil)

Da die Austeilung der Messpunkte beim Schwerlinienverfahren so erfolgt, dass die sich ergebenden, zugeordneten Teilflächen alle gleich groß sind, entspricht das arithmetische Mittel der gemessenen Geschwindigkeiten, bis auf eine Randzonenkorrektur, der mittleren Geschwindigkeit im Querschnitt [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983].

Da jedoch auf Grund der gewählten Sondenausteilung und der Geometrie des Tunnelquerschnitts (siehe Kapitel 2.3.1.1, Abbildung 2-6) nicht für alle Teilflächen bzw. alle Bereiche des Querschnitts Messwerten vorhanden sind, musste die Mittelwertbildung flächengewichtet durchgeführt werden, andernfalls würde der Mittelwert verfälscht werden und die errechnete mittlere Geschwindigkeit zu hoch ausfallen:

$$\bar{v} = \frac{\sum_i g_i v_i}{\sum_i g_i} \quad (2-7)$$

wobei  $g_i$  dem Flächengewicht der  $i$ -ten Teilfläche entspricht und  $v_i$  der zugeordneten, gemessenen örtlichen Geschwindigkeit.

Von den 35 Teilflächen des Messnetzes konnten 3 Flächen nicht mit Sonden besetzt werden. Den 3 nicht erfassten Teilkreissegmenten (in Abbildung 2-6 grau dargestellt) wurde jeweils der Mittelwert der beiden benachbarten Segmente zugeordnet. Die aus dieser Annahme resultierende Unsicherheit kann auf Grund des geringen Flächenanteils der 3 Segmente und der Mittelwertbildung aus den unmittelbaren Nachbarpunkten als gering angesehen werden.

Die nicht erfasste, dreieckige Restfläche (in Abbildung 2-6 grün dargestellt) unter dem Messnetz beträgt etwas mehr als  $8 \text{ m}^2$ , was in etwa 16 % der Gesamtfläche entspricht. Der Fehler, der durch eine Nichtberücksichtigung gemacht werden würde, wäre daher sicherlich nicht vernachlässigbar. Da jedoch keine Sonden zur Abdeckung mehr verfügbar waren, muss hier für die weitere Auswertung eine Annahme getroffen werden. Da es sich größtenteils um eine Randfläche handelt, wurde ihr der Mittelwert der 4 benachbarten Randsegmente (Sonden 01, 02, 15 und 16) zugeordnet. Dies stellt zwar eine Annahme dar, sollte die Überschätzung

der tatsächlichen mittleren Geschwindigkeit im Querschnitt jedoch weitestgehend kompensieren.

Zusätzlich muss beim Schwerlinienverfahren, im Gegensatz zum Verfahren nach Log.-Tschebyschew, welches diesen Umstand bereits implizit berücksichtigt, gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] eine Randzonenkorrektur erfolgen, um das Geschwindigkeitsprofil in Wandnähe ausreichend zu berücksichtigen:

$$v_m = \bar{v} - (\bar{v}_2 - \bar{v}_1) \frac{k}{n} \quad (2-8)$$

$\bar{v}_1$ , und  $\bar{v}_2$  stellen dabei die über den Umfang gemittelten, örtlichen Geschwindigkeiten in den beiden wandnächsten Teilkreisflächen dar,  $k/n$  einen Randzonenkorrekturfaktor gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] der für Kreisquerschnitte von der gewählten Anzahl an Messpunkten je Messradius abhängt. Für  $n = 5$  (wie im gegenständlichen Fall gewählt) beträgt dieser 0,05294.

### 2.3.2.3 Ungleichförmigkeitsgrad der Geschwindigkeitsverteilung

Die in Kapitel 2.3.1.1.1 und 2.3.1.1.2 ermittelte und festgelegte Anzahl an Messpunkten und deren Anordnung im Tunnelquerschnitt gelten nur bei gleichförmigem Geschwindigkeitsprofil. Sollte die Ungleichförmigkeit des vermessenen Geschwindigkeitsprofils ein gewisses Maß überschreiten, so ist die Anzahl an Messpunkten entsprechend zu erhöhen und deren Anordnung im Querschnitt gegebenenfalls anzupassen.

Für Kasten-/ Rechteckquerschnitte (UFT Lendorf) wird der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] auf Basis des maximalen und minimalen Mittelwertes der vier Quadranten bestimmt und auf die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt bezogen:

$$U = \frac{1}{2} \frac{v_{\square|max} - v_{\square|min}}{v_m} \quad (2-9)$$

wobei  $v_{\square}$  die Mittelwerte der Geschwindigkeiten der 4 Quadranten darstellen.

Bei Kreisquerschnitten (Tunnel Falkenberg) müssen gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] zuerst die mittleren Geschwindigkeiten  $\bar{v}_{\varphi i}$  auf den einzelnen Messradien wie folgt bestimmt werden:

$$\bar{v}_{\varphi i} = \frac{1}{n} \sum_i^n v_r \Big|_{\varphi i = const.} \quad (2-10)$$

Der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  ergibt sich dann gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] aus den beiden Mittelwerten  $\bar{v}_{\varphi i}$  mit den größten Abweichungen zur mittleren Geschwindigkeit  $v_m$ :

$$U = \frac{1}{2} \frac{v_{\varphi i|max} - v_{\varphi i|min}}{v_m} \quad (2-11)$$

Gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] gilt ein Geschwindigkeitsprofil bei Ungleichförmigkeitsgraden  $U$  bis 10% noch als gleichförmig, ab 20% hingegen als stark gestört.

### 2.3.3 Abschätzung der Messunsicherheiten

Zufällige Fehler können durch entsprechende Wiederholung bzw. entsprechende Mittelungszeiträume minimiert werden, systematische Fehler hingegen nicht, diese sind ausschließlich von Messaufbau und Messanordnung abhängig [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983].

Gemäß [ISO/DIS 3966, 2008] werden zufällige und systematische Abweichungen gleich behandelt. Dadurch ergibt sich gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] die relative Standardabweichung der gemessenen lokalen Geschwindigkeit an den Messpunkten wie folgt:

$$\frac{\sigma_v}{v} = \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_f}{v} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_\rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\varepsilon}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_E}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_t}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_g}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\beta}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_B}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\zeta}{v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-12)$$

Bezeichnung und Bedeutung der einzelnen relativen Standardabweichungen sowie deren Werte können Tabelle 2-13 entnommen werden.

Da aus den gemessenen örtlichen Geschwindigkeiten in weiterer Folge die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt bestimmt werden soll, muss in weiterer Folge auch noch die relative Standardabweichung des erforderlichen Auswerteprozederes berücksichtigt werden. Dies erfolgt ebenfalls gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983]:

$$\frac{\sigma_{qv}}{qv} = \left[ \left( \frac{\sigma_v}{v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_I}{qv} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{v1}}{qv} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_y}{qv} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_z}{qv} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

Als relative Toleranz der Messergebnisse (Vertrauensbereich 95 %) für die örtliche Geschwindigkeit gilt dann gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983]:

für die örtliche Geschwindigkeit

$$\frac{\delta_v}{v} = \pm 2 \frac{\sigma_v}{v} \quad (2-14)$$

für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt

$$\frac{\delta_{qv}}{qv} = \pm 2 \frac{\sigma_{qv}}{qv} \quad (2-15)$$

In Tabelle 2-13 sind die angenommenen Fehlerwerte sowie das Ergebnis der durchgeführten Abschätzung auf Basis der [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] für die beiden verwendeten Verfahren (Log.-Tschebyschew und Schwerlinienverfahren) dargestellt und zusammengefasst.

**Die geschätzte relative Toleranz beträgt für die Netzmessung mit Staurohren nach Log.-Tschebyschew somit insgesamt  $\pm 1,74\%$ , und nach dem Schwerlinienverfahren  $\pm 2,12\%$ .**

Im Folgenden werden die einzelnen Fehler kurz beschrieben und die Wahl der Werte erläutert:

## **1 Örtliche Geschwindigkeit**

### **1.1 Zufällige Fehler**

#### **Differenzdruck ( $\delta_{\Delta p}$ ):**

hängt in erster Linie von der Genauigkeit des verwendeten Differenzdruckmessumformers ab.

*Die gegenständlich verwendeten Sensoren haben eine Genauigkeit von 0,05% vom Endwert, dies entspricht umgerechnet 0,125 Pa. Der Wert wurde daher mit 0,0005 angenommen.*

#### **Durchflussschwankung ( $\delta_f$ ):**

hängt von der Anzahl der Ablesungen und der Dauer der Beobachtung ab.

*Da die Mittelungszeiträume mit 3 Minuten recht großzügig gewählt wurden, wird der mit 0,001 angesetzt.*

#### **Dichte ( $\delta_\rho$ ):**

hängt von Temperatur, Druck, Feuchte und Reinheit des Gases ab.

*Beim Messmedium handelt es sich um normale Luft bei Umgebungszustand. Ergebnisrelevante Schwankungen von den angeführten Größen sind während der kurzen Messperioden nicht zu erwarten. Der Wert wurde daher mit 0,001 angenommen.*

#### **Kompressibilität ( $\delta_\varepsilon$ ):**

hängt von den vorherrschenden Drücken und Strömungsgeschwindigkeiten ab.

*Die Messungen finden unter Umgebungsbedingungen (atmosphärischer Luftdruck) und bei Geschwindigkeiten deutlich unter 10 m/s statt. In diesem Bereich kann Luft als inkompressibel betrachtet werden, der Wert wurde daher 0 gesetzt.*

### **1.2 Systematische Fehler**

#### **Sondenfaktor ( $\varepsilon_F$ ):**

hängt in erster Linie von Unsicherheiten bei der Kalibrierung ab.

*Da die Kalibrierung in einem Windkanal durchgeführt wurde, dessen Drucksensoren normalerweise für höhere Strömungsgeschwindigkeiten (>10 m/s) ausgelegt sind, wird hier ein Faktor von 0,006 (entspricht dem dreifachen des Normwerts für Staudrucksonden) gesetzt.*

#### **Turbulenzeinfluss ( $\varepsilon_t$ ):**

hängt von der Reynoldszahl (Re) ab.

*Die Luftgeschwindigkeit im Tunnel liegt während der Messungen zwischen 2 und 6 m/s, der hydraulische Durchmesser liegt bei 6,64 bzw. 7,48 m. Die Lufttemperatur während der Messung lag bei ca. 10°C. Die Reynoldszahl für die gegenständlichen Messungen ist somit >10<sup>5</sup>, wodurch der Fehler gemäß Norm unter 0,4% liegt. Der Wert wurde für die Abschätzungen daher mit 0,004 angesetzt.*

#### **Geschwindigkeitsgradient ( $\varepsilon_v$ ):**

hängt vom Verhältnis des minimalen Wandabstands zum Durchmesser der Staurohre ab.

*Die minimalen Wandabstände betragen 0,5 m (Kastenprofil) bzw. 0,25 m (Hufeisenprofil), der Sondendurchmesser beträgt ca. 20 mm. Gemäß Norm ist Wandeinfluss auf das Staurohr in diesem Fall vernachlässigbar.*

#### **Verdrängungseffekt ( $\varepsilon_B$ ):**

hängt vom Verhältnis Staurohrdurchmesser zu hydraulischem Durchmesser des Tunnels ab.

Der hydraulische Durchmesser beträgt 6,64 m (Kastenprofil) bzw. 7,48 m (Hufeisenprofil), der Staurohrdurchmesser ca. 20 mm. Das Verhältnis liegt bei 0,00301 bzw. 0,00267 und somit unter 0,02. Gemäß Norm ist der Verdrängungseffekt somit vernachlässigbar.

### **Schräganströmung ( $\epsilon_\beta$ ):**

Berücksichtigt die Empfindlichkeit der Staurohre gegenüber Schräganströmung.

Da alle Sonden sorgfältig ausgerichtet wurden, kann eine Schräganströmung  $>3$  Grad ausgeschlossen werden, der Faktor kann somit vernachlässigt werden.

### **Druckabfall, Sondenkopf ( $\epsilon_c$ ):**

Wenn Gesamtdruckentnahme und Entnahme des statischen Druckes nicht in einer Ebene liegen entsteht ein Fehler.

Auf die verwendeten Staurohre trifft dies zu. Der Abstand der Entnahmestellen ( $l_{1,2}$ ) entspricht der Länge der Staurohre (200 mm). Der errechnete Fehler für die Anordnung liegt daher bei ca. 0,001.

## **2 Mittlere Geschwindigkeit**

### **2.1 Zufällige Fehler**

#### **Integration ( $\delta_I$ ):**

hängt von Integrationsmethode, Form/Genauigkeit der Aufzeichnung des Geschwindigkeitsprofils ab.

Für den Kastenquerschnitt (Log.-Tschebyschew-Verfahren ohne weitere Korrekturen) wurde der Wert mit 0,002 angenommen, für das Hufeisenprofil (Schwerlinienverfahren mit nachträglicher Randzonenkorrektur) mit 0,005.

#### **Randzonenkorrektur ( $\delta_{v1}$ ):**

hängt in erster Linie vom gewählten Auswerteverfahren ab.

Für den Kastenquerschnitt (Log.-Tschebyschew-Verfahren ohne weitere Korrekturen) wurde der Wert mit 0,003 angenommen, für das Hufeisenprofil (Schwerlinienverfahren mit nachträglicher Randzonenkorrektur) mit 0,005.

#### **Meßpunkteinstellung ( $\delta_v$ ):**

Hängt davon ab wie genau die Messpunkte im Netz eingestellt werden können.

Der Faktor ist gemäß Norm vernachlässigbar bei einem Verhältnis  $\delta_v/y \leq 0,05$ . Um konservativ zu bleiben wurde der Faktor daher mit 0,0005 angesetzt.

### **2.1 Zufällige Fehler**

#### **Messquerschnitt ( $\epsilon_A$ ):**

hängt von der Genauigkeit der Bestimmung des Messquerschnitts ab.

Der Messquerschnitt wurde aus Bauplänen entnommen und stichprobenartig durch Messung vor Ort überprüft. Der Wert wurde daher in beiden Fällen mit 0,002 angesetzt.

#### **Messpunktzahl ( $\epsilon_z$ ):**

hängt von der gewählten Anzahl an Messpunkten ab.

In beiden Fällen hat die Auswertung des Ungleichförmigkeitsgrades gezeigt, dass eine ausreichende Anzahl an Messpunkten gewählt wurde. Der Fehler wurde daher einheitlich mit 0,002 festgelegt.

Tabelle 2-13: Abschätzung der Messunsicherheit Netzmessung mit Staurohren gemäß  
[VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983]

Fehler		Abhängigkeiten	rel. Standard- abweichung	Wert	
				Log.- Tschebysch.	Schwerlinien- verfahren
<b>1</b>	<b>Örtliche Geschwindigkeit</b>				
1.1	<i>Zufällige Fehler</i>				
	Differenzdruck	$\delta_{\Delta p}$ $\Delta p$ , Staurohr, Leitung, Beobachtung	$\sigma_{\Delta p}/\Delta p$	0,0005	0,0005
	Durchflussschwankung	$\delta_f$ Anzahl der Ablesungen / Dauer der Beobachtung	$\sigma_{\Delta p}/v$	0,001	0,001
	Dichte	$\delta_\rho$ Temperatur, Druck, Feuchte und Reinheit des Gases	$\sigma_{\Delta p}/\rho$	0,001	0,001
	Kompressibilität	$\delta_\varepsilon$ Näherungsberechnung, Kompressibilitätsfaktor	$\sigma_{\Delta p}/v$	0	0
1.2	<i>Systematische Fehler</i>				
	Sondenfaktor	$\varepsilon_E$ Unsicherheit Kalibrierung	$\sigma_E/v$	0,006	0,006
	Turbulenzeinfluss	$\varepsilon_t$ Reynoldszahl	$\sigma_t/v$	0,004	0,004
	Geschwindigkeitsgradient	$\varepsilon_g$ $y/d_s$	$\sigma_g/v$	0	0
	Verdrängungseffekt	$\varepsilon_B$ $d_s/D$	$\sigma_B/v$	0	0
	Schräganströmung	$\varepsilon_\beta$	$\sigma_\beta/v$	0	0
	Druckabfall, Sondenkopf	$\varepsilon_z$ $\lambda \cdot l_{1,2}/D$	$\sigma_z/v$	0,001	0,001
<b>2</b>	<b>Mittlere Geschwindigkeit</b>				
2.1	<i>Zufällige Fehler</i>				
	örtl. Geschwindigkeit	$\delta_v$ Wurzel aus der Summe der Fehlerquadrate von 1.1 u. 1.2	$\sigma_v/v$	0,0074	0,0074
	Integration	$\delta_I$ Form / Genauigkeit der Aufzeichnung des Geschwindigkeitsprofils	$\sigma_I/qv$	0,001	0,005
	Randzonenkorrektur	$\delta_{v_1}$ Auswerteverfahren, Wandpunkt-Messung	$\sigma_{v_1}/qv$	0,001	0,003
	Messpunkteinstellung	$\delta_y$	$\sigma_E/qv$	0,0005	0,0005
2.2	<i>Systematische Fehler</i>				
	Messquerschnitt	$\varepsilon_A$	$\sigma_A/A$	0,002	0,002
	Messpunktzahl	$\varepsilon_z$ $n, z_i, z$	$\sigma_z/qv$	0,002	0,002
<b>3</b>	<b>Ergebnis</b>				
	<b>Toleranz der örtlichen Geschwindigkeitsmessung</b>		$\delta_v/v$	$\pm 1,47\%$	$\pm 1,47\%$
	<b>Toleranz der mittleren Strömungsgeschwindigkeit</b>		$\delta_{qv}/qv$	$\pm 1,74\%$	$\pm 2,12\%$
	<i>Vertrauensbereich 95%</i>				

## 2.3.4 Mess- und Berechnungsergebnisse

### 2.3.4.1 Kasten-/ Rechteckprofil

#### 2.3.4.1.1 Ungleichförmigkeitsgrad

Um beurteilen zu können, ob die gewählte Anzahl und Aufteilung der Messsonden für das tatsächlich vorherrschende Strömungsprofil eine repräsentative Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit zulassen, kann der sogenannte Ungleichförmigkeitsgrad U (Berechnung siehe Kapitel 2.3.2.3) herangezogen werden.

Tabelle 2-14 zeigt zusammenfassend die errechneten Ungleichförmigkeitsgrade gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] für die durchgeführten Messungen:

Tabelle 2-14: zusammenfassender Überblick Ungleichförmigkeitsgrad U, Rechteckprofil

Ungleichförmigkeitsgrad U (errechnet für Rechteckquerschnitte gem. VDI/VDE 2640)					
Messung 01	Messung 02	Messung 03	Messung 04	Messung 05	Messung 06
8,49%	7,01%	6,77%	6,28%	5,89%	<b>31,09%</b>

Gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] gilt ein Geschwindigkeitsprofil bei Ungleichförmigkeitsgraden U bis 10% noch als gleichförmig, ab 20% hingegen als stark gestört.

Die aufgezeichneten Strömungsprofile während der Messungen 01 bis 05 liegen zwischen 5,89 und 8,49% und können somit als gleichförmig bezeichnet werden. Anzahl und Aufteilung der Messsonden lassen also eine Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit im betrachteten Querschnitt definitiv zu.

Das Strömungsprofil bei Messung 06 weist jedoch (wie zu erwarten) einen Ungleichförmigkeitsgrad von 31,09% auf und ist somit als stark gestört zu bezeichnen. Bedingt ist dies durch die stark erhöhten, lokalen Geschwindigkeiten im Nahbereich der aktivierten, benachbarten Strahlventilatoren 07 und 08 (siehe Abbildung 2-4).

#### 2.3.4.1.2 Gleichförmiges Strömungsprofil, mittlere Geschwindigkeiten – Messungen 01 bis 05

Die Auswertungen in Kapitel 2.3.4.1.1 zeigen, dass die Messungen 01 bis 05 Ungleichförmigkeitsgrade unter 10% aufweisen und das Geschwindigkeitsprofil somit als gleichförmig bezeichnet werden kann. Anzahl und Aufteilung der Staudrucksonden sind somit dazu geeignet die mittlere Geschwindigkeit im untersuchten Querschnitt zu erfassen.

Die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit im Kasten- bzw. Rechteckprofil erfolgte, wie bereits in Kapitel 2.3.2.1 ausgeführt, gemäß dem Verfahren nach Log.-Tschebyschew. In Tabelle 2-15 werden die errechneten mittleren Geschwindigkeiten der Netzmessung den gemessenen (streckengemittelten) Werten des fix im Tunnel installierten Messgeräts (LG 02) sowie der zusätzlich aufgebauten Begleitmessungen (FVT 01 bis 03) gegenübergestellt. Zusätzlich ist auch noch der gebildete Mittelwert aus den Messungen FVT 01/02 enthalten, da die beiden Messungen doppelt-diagonal und gekreuzt im selben Querschnitt angeordnet wurden. Bei allen dargestellten Werten handelt es sich um zeitliche Mittelwerte über die gesamte Dauer der jeweiligen Messperiode.

Zusätzlich wurde, zur leichteren Vergleichbarkeit, auch die prozentuale Abweichung der

jeweiligen streckengemittelten Ultraschall- zur Netz- bzw. Referenzmessung gebildet und in Tabelle 2-16 zusammengefasst.

Tabelle 2-15: zusammenfassender Überblick Messergebnisse, Rechteckprofil

Rechteckprofil	Netzmessung (+/-1,74%)	LG 02 (+/-0,2 m/s)	FVT 03 (+/-0,2 m/s)	FVT 01 (+/-0,2 m/s)	FVT 02 (+/-0,2 m/s)	Mittelwert FVT 01/02
Messhöhe [mm] über FOK	-	4500	2500	4100-200	200-4100	-
Messung 01 [m/s]	<b>2,44</b>	2,22	2,69	2,65	2,53	2,59
Messung 02 [m/s]	<b>3,36</b>	2,92	3,59	3,52	3,36	3,44
Messung 03 [m/s]	<b>4,00</b>	3,68	4,27	4,18	3,99	4,08
Messung 04 [m/s]	<b>5,20</b>	4,86	5,31	5,30	5,03	5,16
Messung 05 [m/s]	<b>6,07</b>	5,78	6,18	6,13	5,83	5,98

Tabelle 2-16: zusammenfassender Überblick Abweichungen, Rechteckprofil

Rechteckprofil	Netzmessung (+/-1,74%)	LG 02 (+/-0,2 m/s)	FVT 03 (+/-0,2 m/s)	FVT 01 (+/-0,2 m/s)	FVT 02 (+/-0,2 m/s)	Mittelwert FVT 01/02
Messhöhe [mm] über FOK	-	4500	2500	4100-200	200-4100	-
Messung 01 [%]	<b>2,44</b>	-9,15%	+10,31%	+8,31%	+3,45%	+5,88%
Messung 02 [%]	<b>3,36</b>	-13,04%	+6,71%	+4,83%	+0,12%	+2,47%
Messung 03 [%]	<b>4,00</b>	-8,21%	+6,58%	+4,34%	-0,47%	+1,93%
Messung 04 [%]	<b>5,20</b>	-6,54%	+2,19%	+1,94%	-3,16%	-0,61%
Messung 05 [%]	<b>6,07</b>	-4,83%	+1,84%	+0,94%	-4,03%	-1,55%

Jene Messanordnung mit der geringsten Abweichung zum Messnetz ist in Tabelle 2-16 jeweils grün, jene mit der größten Abweichung rot hinterlegt, wobei die beiden doppelt-diagonalen, gekreuzten Messungen FVT 01/02 in diese Bewertung nur als Mittelwert einbezogen wurden.

Es zeigt sich, dass die gekreuzte, doppelt-diagonale Begleitmessung (FVT 01/02, Mittelwert der beiden Messgeräte) mit -1,55 bis +5,88% bei allen Geschwindigkeitsstufen die geringsten relativen Abweichungen aufweist. Betrachtet man die beiden doppelt-diagonalen Messgeräte getrennt voneinander, so zeigen diese unterschiedliches Verhalten. Messung FVT 01 weist relative Abweichungen von +0,94 bis +8,31% auf und überschätzt die mittlere Geschwindigkeit somit in allen Geschwindigkeitsstufen (Messung 01 bis 05) leicht. Messung FVT 02 zeigt hingegen relative Abweichungen zwischen -4,03 und +3,45%, wobei bei niedrigeren Geschwindigkeitsstufen (Messungen 01 und 02) geringfügig überschätzt und bei höheren Stufen (Messungen 04 und 05) etwas unterschätzt wird.

Die Begleitmessung auf Höhe der Mittelachse (FVT 03) weist mit +1,84 bis +10,31% im Vergleich dazu etwas höhere relative Abweichungen auf und überschätzt die mittlere Geschwindigkeit im Messquerschnitt (so wie Begleitmessung FVT 01) somit ebenfalls durchwegs leicht.

Das fest im Tunnel (oberhalb des Lichtraumprofils) installierte Messgerät (LG 02) liefert mit -4,83 bis -13,04% im Schnitt die größten relativen Abweichungen aller untersuchten Konfigurationen und unterschätzt die mittlere Geschwindigkeit damit über alle untersuchten Geschwindigkeitsbereiche.

Unabhängig von der betrachteten Messkonfiguration zeigt sich jedoch, dass die beobachteten

relativen Abweichungen zur Referenznetzmessung mit steigendem Geschwindigkeitsniveau deutlich abnehmen.

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurden die aufgezeichneten Messdaten außerdem dazu verwendet Geschwindigkeitsprofile zu erstellen. Dazu wurden die gemessenen, örtlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Sonden ihren Koordinaten im Querschnitt zugeordnet und mit Hilfe eines Datenverarbeitungsprogramms (Surfer 8, Goldensoftware) daraus Geschwindigkeitsfelder interpoliert und dargestellt.

Um trotz der unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus der 5 Messungen eine einheitliche und vergleichbare Darstellung zu ermöglichen, wurden die Geschwindigkeitsfelder dimensionslos gemacht (die jeweilige örtliche Geschwindigkeit  $v_i$  wird auf die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt  $v_m$  bezogen).

Das resultierende, dimensionslose Isotachenfeld (Blickrichtung entspricht der Strömungs- bzw. Fahrtrichtung) für Messung 01 ist in Abbildung 2-13 dargestellt:

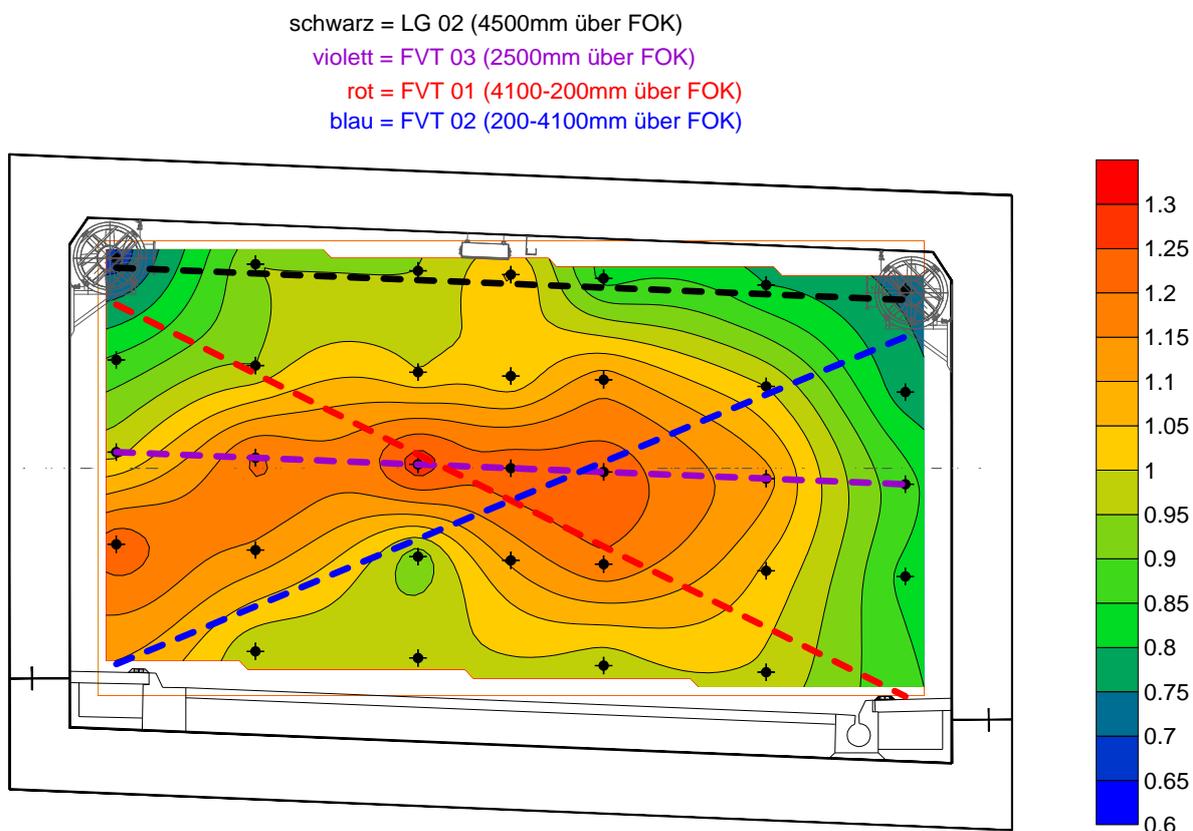


Abbildung 2-13: Messung 01/ Rechteckprofil, dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m$ ,  $v_m=2,44$  m/s

Zusätzlich wurden in Abbildung 2-13 die Messpfade der streckenmittelnden Begleitmessungen FVT 01 bis 03 sowie der fix im Tunnel oberhalb des Lichtraumprofils installierten, ebenfalls streckenmittelnden Geschwindigkeitsmessung LG 02 in das dimensionslose Isotachenfeld eingezeichnet.

Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt prinzipiell eine erkennbare Symmetrie um die horizontale Achse des Rechteckprofils. Klar erkennbar ist ein länglicher Kern mit überhöhten örtlichen Geschwindigkeiten. Die lokale Geschwindigkeit liegt in diesem Bereich um bis zu 30% über der mittleren Geschwindigkeit (das dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnis

$v_i/v_m$  liegt hier zwischen 1,20 und 1,29). In den beiden oberen Ecken des Tunnelprofils zeigen sich jedoch Zonen deutlich niedrigerer lokaler Geschwindigkeiten. Die örtliche, gemessene Geschwindigkeit liegt hier um bis zu 33% unter der errechneten, mittleren Geschwindigkeit im Tunnelquerschnitt ( $v_i/v_m$  liegt hier zwischen 0,67 und 0,75). Grund hierfür sind die in diesem Bereich installierten Strahlventilatoren und deren Befestigungskonsolen (Abstand zueinander jeweils 60 m) welche die Strömung in diesem Bereich abbremsen.

Bezogen auf die Vertikale Achse ist das aufgezeichnete Geschwindigkeitsprofil leicht asymmetrisch, der Grund hierfür liegt darin, dass die UFT Lendorf im Bereich des Messaufbaus eine leichte Rechtskurve aufweist. Links (Kurvenaußenseite) werden dadurch etwas höhere lokale Geschwindigkeiten ( $v_i/v_m$  liegt zwischen 0,95 und 1,20) erreicht als rechts (Kurveninnenseite,  $v_i/v_m$  liegt bei ca. 0,85). Das dimensionslose Verhältnis der (gemessenen) örtlichen zur (errechneten) mittleren Geschwindigkeit  $v_i/v_m$  liegt insgesamt zwischen 0,67 und 1,29, die maximale, lokale Abweichung im Geschwindigkeitsfeld gegenüber der mittleren Geschwindigkeit liegt somit bei ca. 30% in beide Richtungen.

Die streckenmittelnde, fix im Tunnel (oberhalb des Lichtraumprofils) installierte Geschwindigkeitsmessung (LG 02, schwarzer Messpfad in Abbildung 2-13) erfasst die beiden Zonen mit deutlich niedrigeren örtlichen Geschwindigkeiten in den beiden oberen Ecken des Profils, welche durch die dort situierten Strahlventilatoren und deren Befestigungskonsolen bedingt sind, voll. Zudem durchschneidet der Messpfad, wie aus Abbildung 2-13 ersichtlich wird, zu einem großen Teil Zonen mit einem dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnis  $v_i/v_m$  kleiner 1. Dies spiegelt sich in den dort gemessenen, streckengemittelten Geschwindigkeiten (siehe Tabelle 2-15 und Tabelle 2-16) entsprechend wieder, die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt (Referenznetzmessung) wird bei dieser Konfiguration über alle Geschwindigkeitsbereiche unterschätzt.

Die Begleitmessung auf Höhe der horizontalen Mittelachse des Querschnitts (FVT 03, violetter Messpfad in Abbildung 2-13) durchschneidet den Kern mit höheren örtlichen Geschwindigkeiten über seine gesamte Breite, außerhalb des Kerns werden die in diesem Bereich relativ eng beieinander liegenden Zonen gleicher Geschwindigkeit quer und auf kürzestem Weg erfasst, wodurch die Bereiche mit einem dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnis gleich 1 oder darunter in Summe entlang des Messpfades eher unterrepräsentiert sind. Die entlang dieses Pfades gemessenen Geschwindigkeiten bestätigen dies (siehe Tabelle 2-15 und Tabelle 2-16), die mittlere Geschwindigkeit wird bei dieser Anordnung in allen Messungen leicht überschätzt.

Die Messpfade der beiden doppelt-diagonal und gekreuzt angeordneten Begleitmessungen (FVT 01 und 02) sind in Abbildung 2-13 rot bzw. blau dargestellt. Auf Grund der leichten Asymmetrie des Geschwindigkeitsfeldes ergeben sich für die beiden Messgeräte etwas unterschiedliche Messpfadverläufe. Der rote Messpfad (FVT 01) durchschneidet den Kern auf etwas längerem Weg, gleichzeitig liegen die Isotachen im rechten unteren Bereich (Kurveninnenseite) enger zusammen als im linken unteren Bereich (Kurvenausenseite). Dies führt dazu, dass der rote Messpfad die enger liegenden Zonen konstanter Geschwindigkeit in steilerem Winkel (und dadurch auf kürzerem Weg) durchläuft, während der blaue Pfad (FVT 02) die breiteren Zonen in etwas flacherem Winkel schneidet. In Summe führt dies bei Messung FVT 01 zu einer leichten Überschätzung der mittleren Geschwindigkeit in allen Messungen, während Messung FVT 02 mit seinem Messpfad die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt über alle Messungen recht gut abbildet.

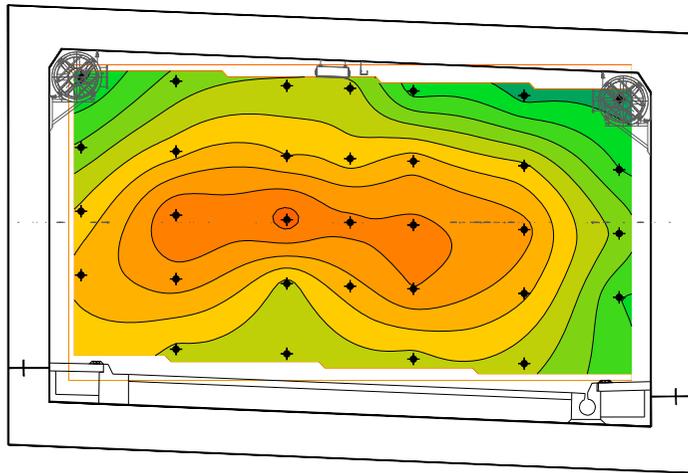
Beiden Pfade erfassen jedoch zum Teil auch die Zonen niedrigerer Geschwindigkeiten in den oberen Ecken des Profils, durchkreuzen den Kern mit höheren Geschwindigkeiten jeweils quer und durchschneiden die außerhalb davon enger beisammen liegenden Zonen mit einem dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnis  $v_i/v_m$  gleich bzw. kleiner 1 ebenfalls leicht

schräg. Dadurch werden die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche im Querschnitt recht gut und ihrem Anteil entsprechend über den Messpfad gemittelt, was dazu führt, dass die Ergebnisse in beiden Fällen geringere Abweichungen zur Referenz (Netzmessung) aufweisen, als die beiden anderen Konfigurationen (FVT 03 und LG 02). Die Mittelwertbildung der beiden Messanordnungen führt dazu, dass die durch die Asymmetrie des Geschwindigkeitsfeldes hervorgerufenen Unterschiede zwischen den Messpfaden noch zusätzlich ausgeglichen werden, weshalb die Mittelung der beiden doppelt-diagonal und gekreuzt angeordneten Begleitmessungen das insgesamt beste Ergebnis und mit -1,55% bis +5,88% sehr geringe und relativ gleichmäßige, Abweichungen über alle Geschwindigkeitsbereich aufweist.

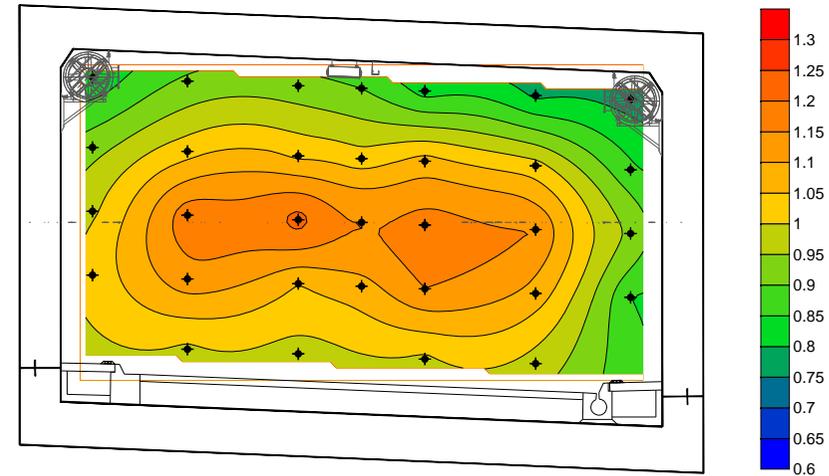
Für die Messungen 02 bis 04 wurden ebenfalls dimensionslose Isotachenfelder erstellt. Diese sind in Abbildung 2-14 dargestellt (Blickrichtung entspricht ebenfalls immer der Strömungs- bzw. Fahrtrichtung). Um eine optimale Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde die Farbskalierung gegenüber der Darstellung von Messung 01 (Abbildung 2-13) nicht geändert.

Die Profile zeigen, dass die beschriebene Charakteristik weitestgehend über den betrachteten Geschwindigkeitsbereich (ca. 2,4 bis 6 m/s) konstant bleibt. Mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit sinken die maximalen, lokalen Abweichungen im Geschwindigkeitsfeld von ca.  $\pm 30\%$  (Messung 01) etwas auf ca.  $\pm 20\%$  (Messung 05). Bedingt wird dies im Grunde genommen dadurch, dass die Überhöhung im Bereich des Profilkerns mit steigender mittlerer Geschwindigkeit etwas zurückgeht und zudem die Ausprägung der Zonen niedrigerer, lokaler Geschwindigkeiten im Bereich der Strahlventilatoren ebenfalls abnimmt.

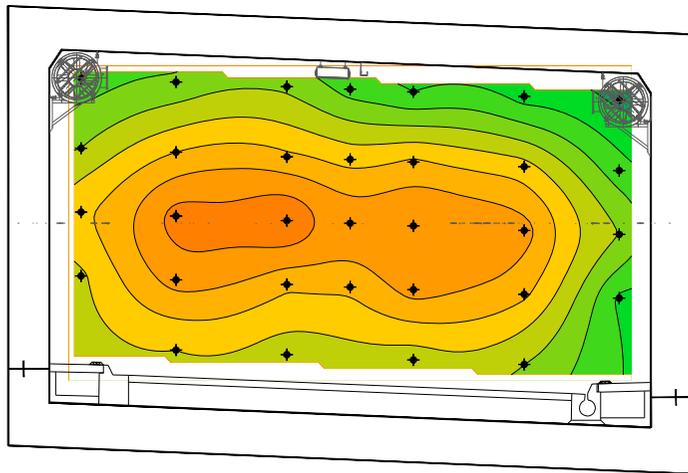
Die leichte Asymmetrie zu Folge der Rechtskurve bleibt jedoch über den gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich erhalten.



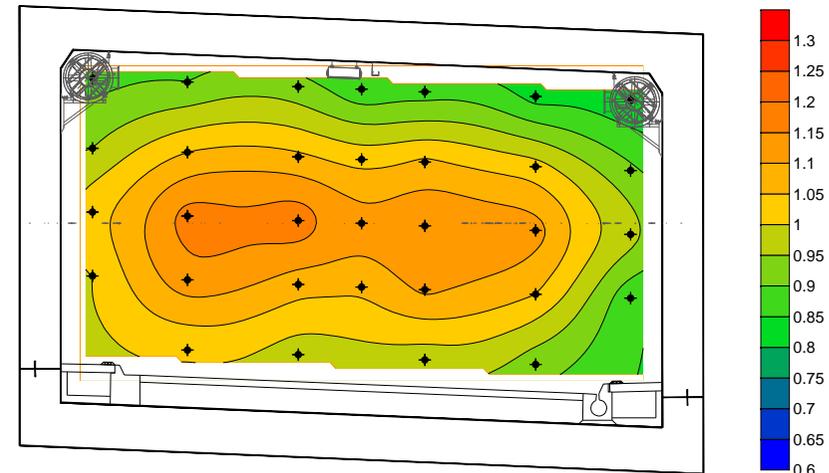
Messung 02 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 3,36$  m/s



Messung 03 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 4,00$  m/s



Messung 04 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 5,20$  m/s



Messung 05 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 6,07$  m/s

Abbildung 2-14: Geschwindigkeitsprofile / dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m$ , Messungen 02 bis 05 - Rechteckprofil

### 2.3.4.1.3 Gestörtes Geschwindigkeitsprofil, Rechteckprofil - Messung 06

Bei Messung 06 wurde durch das Aktivieren unmittelbar benachbarter Strahlventilatoren (Entfernung Lüfter zu Messnetz nur ca. 40 m) ein stark beeinflusstes Geschwindigkeitsprofil im Bereich des Messaufbaus erzeugt.

In Abbildung 21 ist die aufgezeichnete Geschwindigkeitsverteilung im Tunnelquerschnitt in Form dimensionsloser Isotachen ( $v_i/v_m$ ) dargestellt (Blickrichtung entgegen der Fahrt- und Strömungsrichtung).

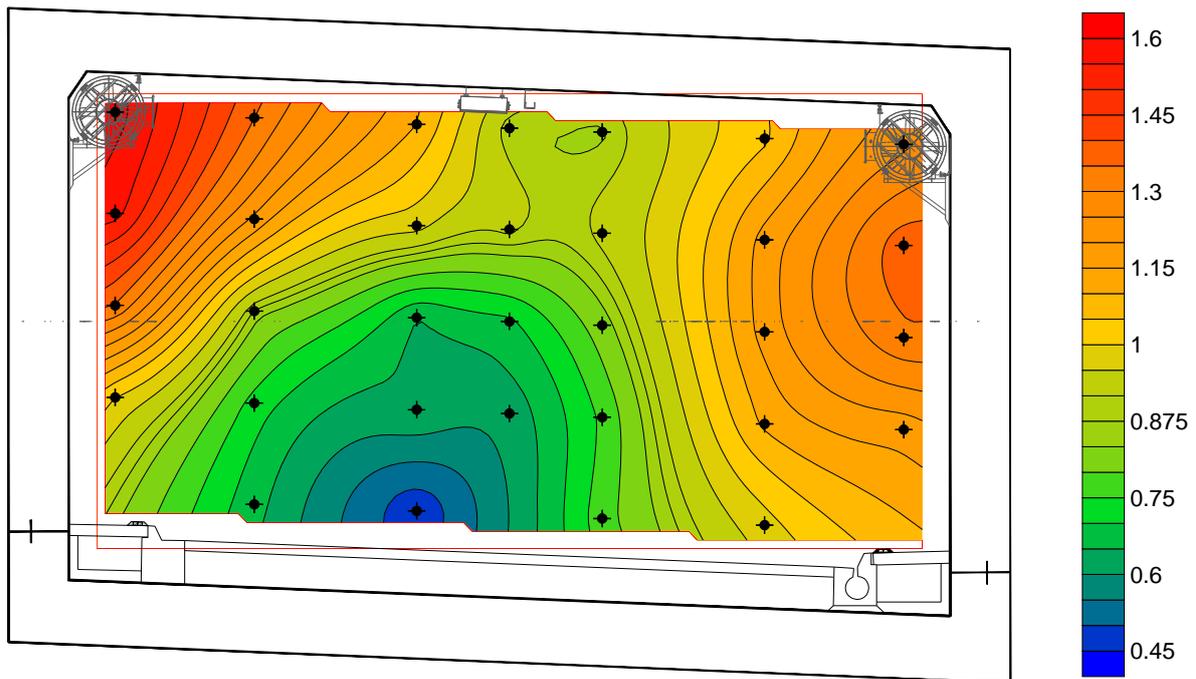


Abbildung 2-15: beeinflusstes Strömungsprofil- dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m$ ,  $v_m=-4,54$  m/s

Deutlich erkennbar sind die stark überhöhten Geschwindigkeitsbereiche in den Ecken. Die dimensionslosen Isotachen  $v_i/v_m$  liegen in diesen Bereichen zwischen 1,3 und 1,6 was bedeutet dass die lokalen Geschwindigkeiten 30 bis 60% gegenüber der ‚mittleren‘ Geschwindigkeit erhöht sind. Absolut werden hier Geschwindigkeiten von nahezu 8 m/s gemessen. Verursacht wird dies durch die hohe Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren welche in diesem Bereich installiert sind.

Gleichzeitig bildet sich im Zentrum des Querschnitts, auf Grund der leichten Rechtskurve etwas außermittig, ein großer Bereich mit extrem niedrigen lokalen Geschwindigkeiten aus. Die dimensionslosen Isotachen  $v_i/v_m$  liegen hier zwischen 0,45 und 0,75 oder anders ausgedrückt die lokalen Geschwindigkeiten sind um 25 bis 55% geringer als im Mittel. Absolut gesehen, erreicht die örtliche Luftgeschwindigkeit im Zentrum des Querschnitts gerade einmal knapp 2 m/s.

Das Verhältnis der (gemessenen) örtlichen Geschwindigkeit zur (errechneten) mittleren Geschwindigkeit liegt im vorliegenden Fall somit insgesamt zwischen 0,45 und 1,65. Der Vergleich zu den unbeeinflussten Messungen 01 bis 05, bei welchen dieses Verhältnis relativ konstant zwischen 0,70 und 1,30 liegt, unterstreicht diese starke Ungleichförmigkeit ebenfalls.

Der gemäß VDI/VDE-Richtlinie errechneten Ungleichförmigkeitsgrad  $U=31,09\%$  (siehe Kapitel 2.3.4.1.1) liegt deutlich über dem Grenzwert von 10% bis zu dem ein Geschwindigkeitsprofil noch als gleichförmig bezeichnet werden darf.

Da der Ungleichförmigkeitsgrad viel zu hoch ist, ist für den vorliegenden Fall die Anzahl und Austeilung der Sonden streng genommen eigentlich nicht ausreichend, um das Log.-Tschebyschew-Verfahren anwenden zu dürfen.

Um jedoch trotzdem zumindest qualitative Vergleiche mit den (ebenfalls beeinflussten) Begleitmessungen durchführen zu können, wurde trotzdem die mittlere Geschwindigkeit im Tunnelquerschnitt ausgewertet:

Tabelle 2-17: Zusammenfassung Messergebnisse, Rechteckprofil – Messung 06

Messung	Netzmessung	LG 02	FVT 03	FVT 01	FVT 02	Mittelwert FVT 01/ 02
Messhöhe [mm]	-	4500	2500	4100-200	200-4100	-
Messwert [m/s]	-4,54	-4,32	-3,78	-3,71	-3,51	-3,61
Abweichung [%]	-	-4,82	-16,82	-18,42	-22,79	-20,61

Die Ergebnisse (dargestellt in Tabelle 2-17) zeigen, dass mit Ausnahme der fix im Tunnel installierten Messung über dem Lichtraumprofil LG 02 (Abweichung knapp -5%) die Abweichungen zwischen 17 und 23% liegen.

Diese erheblichen Abweichungen sind dadurch begründbar, dass die Messpfade der installierten Begleitmessungen (einfach-diagonale Messung auf Höhe der Mittelachse - FVT 03, sowie die beiden doppelt-diagonalen Messungen – FVT 01 und FVT 02) den ‚langsamen‘ Mittelbereich durchkreuzen und gleichzeitig den Bereich mit überhöhten Geschwindigkeiten nahezu gar nicht erfassen. Die Mittelwertbildung der beiden gekreuzten doppelt-diagonalen Messanordnung FVT 01 und FVT 02 führt dadurch ebenfalls zu keiner Verbesserung des Messergebnisses. Die fest im Tunnel installierte, einfach diagonale Messanlage LG 02 oberhalb des Lichtraumprofils liegt jedoch zur Gänze oberhalb des langsamen Bereichs und bildet daher die mittleren und höheren Geschwindigkeitsbereiche deutlich besser ab.

In Summe ist bei einem derart gestörten Geschwindigkeitsprofil in jedem Fall davon auszugehen, dass jede Art von Punkt oder Linienmessung streng genommen ungeeignet ist, repräsentative Daten bezüglich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in einem Kasten- bzw. Rechteckprofil zu liefern. Dies gilt es bei der Situierung von Längsgeschwindigkeitsmessstellen im Tunnel unbedingt zu beachten.

### 2.3.4.2 Hufeisenprofil

#### 2.3.4.2.1 Ungleichförmigkeitsgrad

Um beurteilen zu können, ob die gewählte Anzahl und Aufteilung der Messsonden für das tatsächlich vorherrschende Strömungsprofil eine repräsentative Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit zulassen, kann der sogenannte Ungleichförmigkeitsgrad U (Berechnung siehe Kapitel 2.3.2.3) herangezogen werden.

Tabelle 2-14 zeigt zusammenfassend die errechneten Ungleichförmigkeitsgrade gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] für die durchgeführten Messungen:

Tabelle 2-18: zusammenfassender Überblick Ungleichförmigkeitsgrad U, Rechteckprofil

Ungleichförmigkeitsgrad U (errechnet für Rechteckquerschnitte gem. VDI/VDE 2640)					
Messung 01	Messung 02	Messung 03	Messung 04	Messung 05	Messung 06
8,49%	7,01%	6,77%	6,28%	5,89%	<b>31,09%</b>

Gemäß [VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3, 1983] gilt ein Geschwindigkeitsprofil bei Ungleichförmigkeitsgraden U bis 10% noch als gleichförmig, ab 20% hingegen als stark gestört.

Die aufgezeichneten Strömungsprofile während der Messungen 01 bis 05 liegen zwischen 5,89 und 8,49% und können somit als gleichförmig bezeichnet werden. Anzahl und Aufteilung der Messsonden lassen also eine Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit im betrachteten Querschnitt definitiv zu.

Das Strömungsprofil bei Messung 06 weist jedoch (wie zu erwarten) einen Ungleichförmigkeitsgrad von 31,09% auf und ist somit als stark gestört zu bezeichnen. Bedingt ist dies durch die stark erhöhten, lokalen Geschwindigkeiten im Nahbereich der aktivierten, benachbarten Strahlventilatoren 07 und 08 (siehe Abbildung 2-4).

#### 2.3.4.2.2 Gleichförmiges Strömungsprofil, mittlere Geschwindigkeiten – Messungen 01 bis 05

In Kapitel 2.3.4.2.1 wurden die Ungleichförmigkeitsgrade der Messungen 01 bis 05 ermittelt. Auch für die durchgeführten Messungen im Hufeisenprofil liegt die Ungleichförmigkeit unter 10%, wodurch die Geschwindigkeitsprofile als gleichförmig bezeichnet werden können. Anzahl und Aufteilung der Staudrucksonden sind somit dazu geeignet die mittlere Geschwindigkeit im untersuchten Querschnitt zu erfassen.

Die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit im Hufeisenprofil erfolgte, wie bereits in Kapitel 2.3.2.2 ausgeführt, nach dem sogenannten Schwerlinienverfahren. Tabelle 2-19 zeigt eine Gegenüberstellung der errechneten mittleren Geschwindigkeiten (Netz- bzw. Referenzmessung) den gemessenen (streckengemittelten) Werten der für die Untersuchungen aufgebauten Begleitmessungen (FVT 01 bis 03) sowie des fix im Tunnel oberhalb des Lichtraumprofils installierten Messgeräts (LG 02). Zudem wurde, wie bereits beim Kasten-/Rechteckprofil, zusätzlich auch noch der Mittelwert aus den beiden doppelt-diagonal und gekreuzt angeordnet Messungen FVT 01/02 gebildet. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen dargestellten Werten um zeitliche Mittelwerte handelt, welche über die gesamte Dauer der jeweiligen Messperiode gebildet wurden.

Zur leichteren Vergleichbarkeit wurde auch bei der Hufeisenmessung zusätzlich die

prozentuale Abweichung der jeweiligen streckengemittelten Ultraschall- zur Netz- bzw. Referenzmessung gebildet, welche in Tabelle 2-20 zusammengefasst dargestellt sind:

Tabelle 2-19: zusammenfassender Überblick Messergebnisse, Hufeisenprofil

Hufeisenprofil	Netzmessung (+/-2,12%)	LG 02 (+/-0,2 m/s)	FVT 03 (+/-0,2 m/s)	FVT 01 (+/-0,2 m/s)	FVT 02 (+/-0,2 m/s)	Mittelwert FVT 01/02
Messhöhe [mm] über FOK	-	4700	2840	4100-200	200-4100	-
Messung 01 [m/s]	<b>2,31</b>	2,21	2,30	2,27	2,18	2,22
Messung 02 [m/s]	<b>3,68</b>	3,48	3,64	3,59	3,41	3,20
Messung 03 [m/s]	<b>4,43</b>	4,24	4,40	4,29	4,05	4,17
Messung 04 [m/s]	<b>5,84</b>	5,76	5,76	5,62	5,24	5,43
Messung 05 [m/s]	<b>6,44</b>	6,46	6,43	6,21	5,83	6,02

Tabelle 2-20: zusammenfassender Überblick Abweichungen, Hufeisenprofil

Hufeisenprofil	Netzmessung (+/-2,12%)	LG 02 (+/-0,2 m/s)	FVT 03 (+/-0,2 m/s)	FVT 01 (+/-0,2 m/s)	FVT 02 (+/-0,2 m/s)	Mittelwert FVT 01/02
Messhöhe [mm] über FOK	-	4700	2840	4100-200	200-4100	-
Messung 01 [%]	-	-4,23	-0,30	-1,94	-5,51	-3,73
Messung 02 [%]	-	-5,65	-1,30	-2,51	-7,51	-5,01
Messung 03 [%]	-	-4,48	-0,86	-3,22	-8,77	-6,00
Messung 04 [%]	-	-1,26	-1,32	-3,75	-10,22	-6,99
Messung 05 [%]	-	+0,23	-0,27	-3,58	-9,52	-6,55

Analog zum Kasten-/ Rechteckprofil wurde die Messanordnung mit der geringsten Abweichung zur Referenz (Netzmessung) in Tabelle 2-20 jeweils grün, jene mit der größten Abweichung rot hinterlegt. Die beiden doppelt-diagonalen, gekreuzten Messungen FVT 01/02 wurden in diese Bewertung jedoch nur als Mittelwert einbezogen.

Die Begleitmessung auf Höhe der Mittelachse (FVT 03) weist mit -1,32 bis -0,27% bei allen Geschwindigkeitsstufen die geringsten relativen Abweichungen auf und bildet die mittlere Geschwindigkeit im betrachteten Querschnitt sehr gut ab.

Das fix im Tunnel installierte Messgerät (LG 02, oberhalb des Lichtraumprofils) zeigt ein sehr unterschiedliches Verhalten über die verschiedenen Geschwindigkeitsstufen. Die Abweichungen liegen zwischen -5,65 und +0,23%, wobei auffällt, dass bei den niedrigeren Geschwindigkeiten (Messungen 01 bis 03) die Abweichungen mit -5,65 bis -4,23% deutlich höher sind als bei höheren Geschwindigkeiten (Messung 04 und 05). Tendenziell wird die mittlere Geschwindigkeit bei dieser Anordnung leicht unterschätzt.

Der Mittelwert der beiden doppelt-diagonalen, gekreuzten Messungen FVT 01 und 02 zeigten, mit Ausnahme der niedrigsten untersuchten Geschwindigkeitsstufe (Messung 01), die höchsten Abweichungen zur Referenz (Netzmessung). Diese liegt bei Messung 01 bei -3,73%, bei den Messungen 02 bis 05 zwischen -6,99 und -5,01%. Auffällig sind hierbei jedoch die stark voneinander abweichenden Ergebnisse der beiden Einzelmessungen FVT 01 und 02. Aus diesem Grund sollen in weiterer Folge die beiden Einzelmessungen noch etwas näher betrachtet werden.

Einzelmessung FVT 01 weist mit Abweichungen von -3,75 bis -1,94% zwar relativ konstant aber nur leicht von der errechneten mittleren Geschwindigkeit im Messnetz ab (bei

niedrigeren Geschwindigkeiten liegen die Abweichungen sogar etwas unter der fest im Tunnel installierten Messung LG 02). Die mittlere Geschwindigkeit in der Messebene wird mit dieser Anordnung somit durchwegs leicht unterschätzt.

Einzelmessung FVT 02 hingegen weicht bei allen Messungen deutlich (-10,22 bis -5,51%) von der Referenz-/Netzmessung ab. Während die Einzelmessung FVT 01 eine über alle Geschwindigkeitsbereiche relativ konstante Abweichung aufweist, nimmt diese bei Einzelmessung FVT 02 mit steigender mittlerer Geschwindigkeit zu. Auch hier wird die mittlere Geschwindigkeit im betrachteten Querschnitt unterschätzt. Wie aus Abbildung 2-14 ersichtlich wird, liegt der Grund für die höheren Abweichungen der Einzelmessung FVT 02 darin, dass der schräg liegende Bereich höherer Geschwindigkeiten von Messung FVT 01 (rote unterbrochene Linie) zumindest durchschnitten wird, während Messung FVT 02 (blaue durchbrochene Linie) zur Gänze unter diesem Kernbereich liegt. Die Mittelwertbildung kann die relativ starken Abweichungen der Einzelmessung FVT 02 zwar abmildern, insgesamt weist die doppelt-diagonale, gekreuzte Anordnung jedoch trotzdem die höchsten relativen Abweichungen auf.

Auch für das Hufeisenprofil wurden aus den vorhandenen Messdaten Geschwindigkeitsprofile erstellt, Interpolation und Darstellung erfolgte ebenfalls mit dem Softwarepaket Surfer 8 von Goldensoftware. Die Strömungsprofile sind wiederum dimensionslos (örtlichen Geschwindigkeiten  $v_i$  bezogen auf mittlere Geschwindigkeit  $v_m$ ), um eine einheitliche und vergleichbare Darstellung zu gewährleisten.

Das resultierende, dimensionslose Isotachenfeld (Blickrichtung entspricht der Strömungs- bzw. Fahrtrichtung) für Messung 01 ist in Abbildung 2-16 dargestellt.

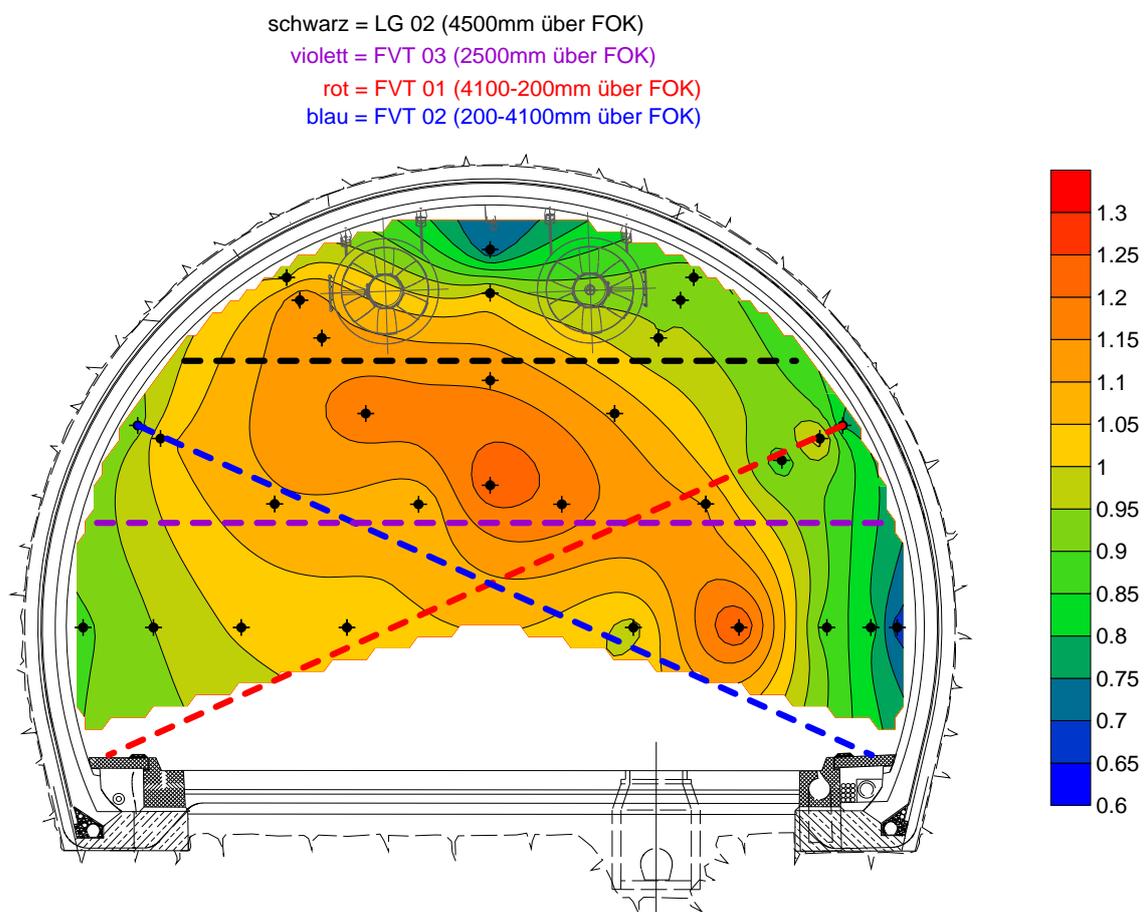


Abbildung 2-16: Messung 01/ Hufeisenprofil, dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m$ ,  $v_m=2,31$  m/s

Es wurden in Abbildung 2-16, analog zum Kasten-/Rechteckprofil, auch die Messpfade der Begleitmessungen FVT 01 bis 03 sowie der fix im Tunnel oberhalb des Lichtraumprofils installierten Geschwindigkeitsmessung LG 02 in das dimensionslose Isotachenfeld eingezeichnet.

Das Geschwindigkeitsfeld zeigt einen deutlich erkennbaren, schräg liegenden Kern mit erhöhten örtlichen Geschwindigkeiten, dessen Zentrum eindeutig oberhalb der Flächenmitte liegt. Die lokale Geschwindigkeit liegt in diesem Bereich um bis zu 32% über der mittleren Geschwindigkeit (das dimensionslose Verhältnis der örtlichen Geschwindigkeit  $v_i$  zur mittleren Geschwindigkeit  $v_m$  liegt hier zwischen 1,1 und 1,32). Zusätzlich zeigt sich eine Zone deutlich niedrigerer lokaler Geschwindigkeiten im Bereich unmittelbar unter der Tunnelfirste, was auf die in diesem Bereich installierte, zentrale Kabeltasse und Durchfahrtsbeleuchtung sowie die links und rechts davon hängenden Strahlventilatoren (Abstand zueinander jeweils 100 m) zurückzuführen ist. Die örtliche gemessene Geschwindigkeit liegt dort bis zu 30% unter der errechneten, mittleren Geschwindigkeit im Hufeisenquerschnitt ( $v_i/v_m$  liegt in diesem Bereich zwischen 0,70 und 0,95).

Der Tunnel Falkenberg weist im Bereich des Messaufbaus, wie bereits die UFT Lendorf, eine relativ ausgeprägte Rechtskurve auf. Dies führt zu der deutlich erkennbaren ‚Schräglage‘ des Profilkerns und der umliegenden Geschwindigkeitszonen. Zusätzlich können auch beim Tunnel Falkenberg die bereits bei den Untersuchungen zum Kastenprofil festgestellten Auswirkungen der Rechtskurve erneut beobachtet werden: Links (Kurvenaußenseite) treten höhere lokale Geschwindigkeiten auf ( $v_i/v_m$  liegt zwischen 0,85 und 1,05) als rechts (Kurveninnenseite,  $v_i/v_m$  liegt zwischen 0,70 und 0,95). Die Isotachen (Linien konstanter Geschwindigkeit) weisen zudem im Kurveninneren deutlich engere Abstände zueinander auf (stärker ausgeprägter Geschwindigkeitsgradient).

Das dimensionslose Verhältnis der (gemessenen) örtlichen zur (errechneten) mittleren Geschwindigkeit  $v_i/v_m$  liegt insgesamt zwischen 0,70 und 1,32, die maximale, lokale Abweichung im Geschwindigkeitsfeld gegenüber der mittleren Geschwindigkeit liegt somit bei ca. 30% in beide Richtungen und somit in der selben Größenordnung wie sie bereits beim Kasten- bzw. Rechteckprofil festgestellt werden konnte.

Die schwarze Linie in Abbildung 2-16 stellt den Messpfad von LG 02, (fix im Tunnel oberhalb des Lichtraumprofils installierte Geschwindigkeitsmessung) dar. Dieser erfasst zwar noch den oberen Teil des leicht schräg liegenden Kerns mit erhöhten örtlichen Geschwindigkeiten, außerhalb des Kerns durchläuft der Pfad jedoch durchwegs Zonen mit einem dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnis  $v_i/v_m$  gleich oder kleiner 1 in schrägem Winkel. Die kurvenbedingten Geschwindigkeitsunterschiede in den unteren äußeren Bereichen des Querschnitts werden von dieser Konfiguration jedoch nicht erfasst. Dies führt zu den anfänglich etwas höheren Abweichungen (Messungen 01 bis 03, siehe Tabelle 2-19 und Tabelle 2-20) und der insgesamt leichten Unterschätzung der mittleren Geschwindigkeit (Referenzmessung).

Mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit im Querschnitt wird das Geschwindigkeitsfeld etwas ebener und der Kern kleiner (siehe Abbildung 2-17). Dadurch durchläuft der Messpfad die in diesem Bereich fast parallel dazu verlaufenden Zonen gleicher Geschwindigkeit nahezu über seine gesamte Länge bei einem dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnis von 1. Dies spiegelt sich auch in den sehr geringen Abweichungen bei höheren Geschwindigkeiten (Messung 04 und 05, siehe Tabelle 2-19 und Tabelle 2-20) wieder.

Die violette Linie in Abbildung 2-16 – ungefähr auf Höhe der horizontalen Mittelachse des Querschnitts – stellt den Messpfad der Begleitmessung FVT 03 dar. Dieser durchschneidet den schräg liegenden Kern ( $v_i/v_m > 1$ ) ziemlich mittig, außerhalb des Kerns werden die in diesem Bereich relativ eng beieinander liegenden Zonen gleicher Geschwindigkeit zwar quer

und somit auf kürzestem Weg durchlaufen, es wird jedoch sowohl die Zone mit langsameren Geschwindigkeiten auf der Kurveninnen-, als auch jene mit etwas höheren Geschwindigkeiten auf der Kurvenaußenseite erfasst. In Summe werden die auftretenden Geschwindigkeitszonen dadurch anteilmäßig recht gut abgebildet, was zu der sehr guten Übereinstimmung und den äußerst geringen Abweichungen von -1,32 bis -0,27% führt (siehe Tabelle 2-19 und Tabelle 2-20).

Der rote und der blaue Messpfad stellen die beiden gekreuzten und doppelt-diagonal angeordneten Messgeräte dar. Im Gegensatz zur Messung im Kastenprofil zeigt sich ein stark unterschiedliches Bild für die beiden Mittelungsstrecken:

Die rote Linie in Abbildung 2-16 repräsentiert den Messpfad der Begleitmessung FVT 01. Der Pfad durchläuft anfangs die eng beisammenstehenden äußeren Zonen ( $v_i/v_m < 1$ ) auf kürzestem Weg, bevor er den Kern etwas außerhalb der Mitte schneidet. Anschließend werden die auf der Außenseite der Kurve deutlich weiter auseinanderliegenden Zonen leicht schräg erfasst. Die langsamere Zone im Bereich der Kurveninnenseite wird nicht erfasst. Dies führt dazu, dass die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt recht passabel abgebildet wird und die relativen Abweichungen über alle Geschwindigkeitsbereiche recht konstant sind (siehe Tabelle 2-19 und Tabelle 2-20). Die Messung unterschätzt den errechneten Mittelwert der Geschwindigkeit im Messnetz jedoch in Summe leicht.

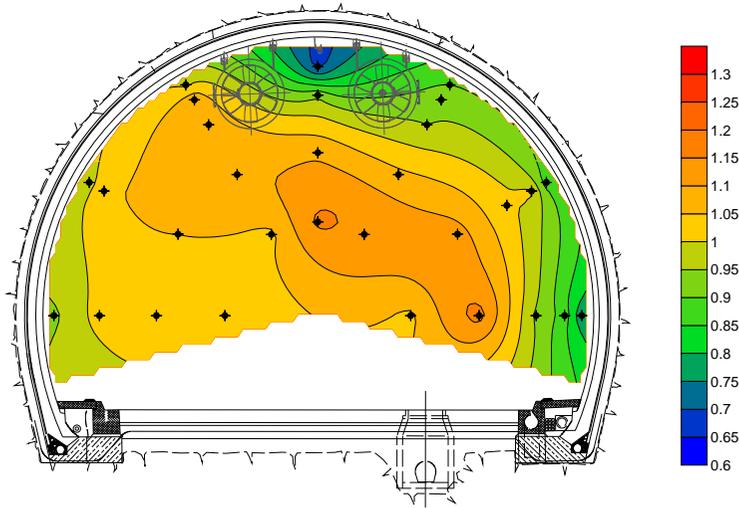
Die blaue Linie in Abbildung 2-16 stellt den Messpfad der zweiten doppelt-diagonalen Kreuzmessung FVT 02 dar. Dieser verläuft nahezu parallel unter dem schräg liegenden Kern vorbei und erfasst diesen somit überhaupt nicht. Gleichzeitig erfasst der Pfad jedoch, im Gegensatz zur gekreuzten Gegenmessung FVT 01, den rechten unteren Bereich des Querschnitts (Kurveninnenseite), in dem deutlich niedrigere Geschwindigkeiten vorherrschen ( $v_i/v_m < 1$ ). Dies führt in Summe dazu, dass die gemessenen Werte die mittlere Geschwindigkeit deutlich unterschätzen und die Abweichungen merkbar höher sind (bis -10,22%) als bei der Gegenmessung FVT 01 (siehe Tabelle 2-19 und Tabelle 2-20).

Die Mittelwertbildung der beiden gekreuzten Messungen vermag diese Abweichung nur bedingt auszugleichen. Die Mittelwerte der beiden gekreuzten, streckenmittelnten Messungen liegen recht konstant zwischen 5 und 7% unter dem Mittelwert des Referenzmessnetzes. Abbildung 2-16 zeigt klar dass der Kreuzungspunkt der beiden Messpfade etwas zu tief liegt so dass beide Messpfade alle Geschwindigkeitsbereiche adäquat durchschneiden und in die streckenmittelung dadurch mit einbeziehen können. Deshalb liefert die Kreuzmessung, im Gegensatz zu den Messungen im Kastenprofil, ein deutlich schlechteres Ergebnis.

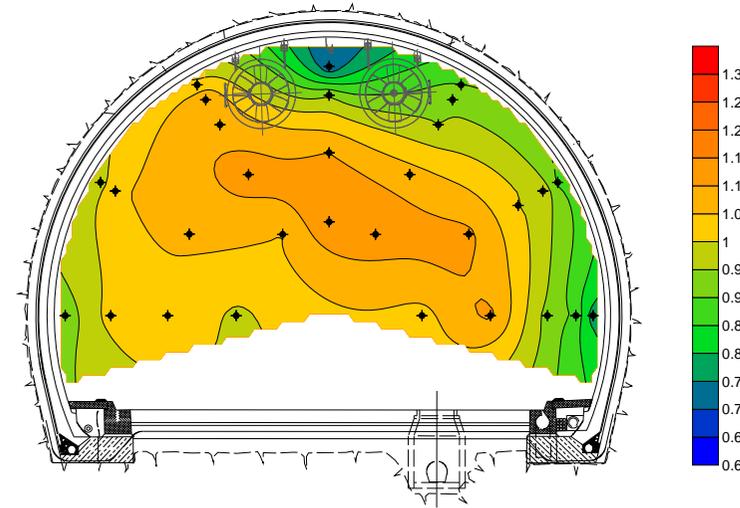
Für die Messungen 02 bis 04 wurden ebenfalls dimensionslose Isotachenfelder erstellt (siehe hierzu Abbildung 2-17, Blickrichtung entspricht der Strömungs- bzw. Fahrtrichtung). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde die Farbskalierung gleich gewählt wie bei der Darstellung von Messung 01 (Abbildung 2-16).

Die Geschwindigkeitsfelder zeigen, dass deren Charakteristik über den gesamten getesteten Geschwindigkeitsbereich (ca. 2,3 bis 6,4 m/s) weitestgehend erhalten bleibt. Mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit sinken, wie bereits beim Kastenprofil zu beobachten war, die maximalen, lokalen Abweichungen im Geschwindigkeitsfeld von ca.  $\pm 30\%$  (Messung 01) auf ca.  $\pm 20\%$  (Messung 05). Bedingt wird dies auch beim Hufeisenprofil dadurch dass die Überhöhung im Bereich des Profilkerns mit steigender mittlerer Geschwindigkeit etwas zurückgeht.

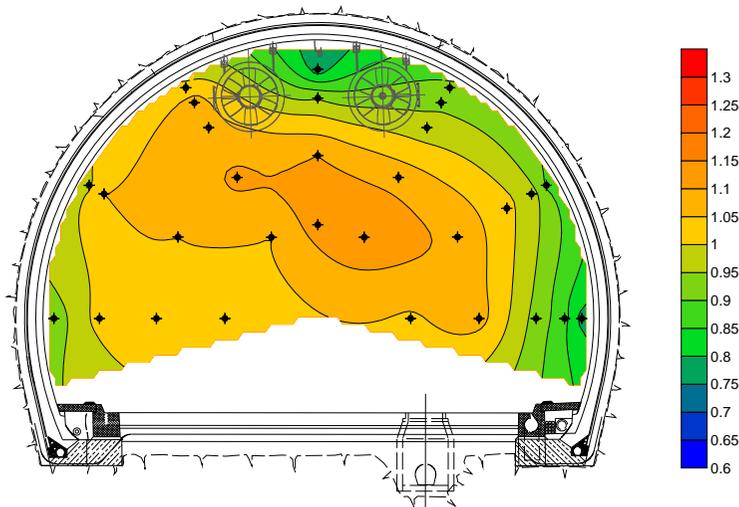
Die leichte ‚Schräglage‘ des Geschwindigkeitsfeldes sowie die Asymmetrie als Folge der Kurve im Bereich des Messaufbaus bleiben jedoch auch beim Hufeisenprofil über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich vorhanden.



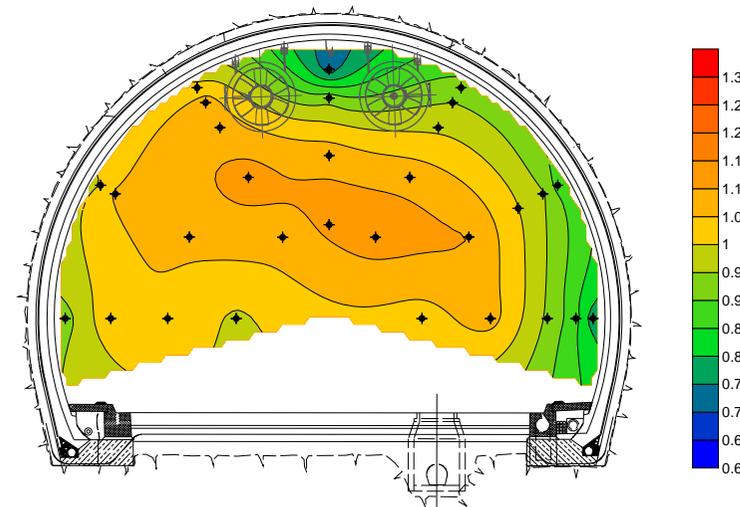
Messung 02 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 3,68$  m/s



Messung 03 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 4,43$  m/s



Messung 04 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 5,84$  m/s



Messung 05 – dimensionslose Isotachen  $v_i / v_m$ ,  $v_m = 6,44$  m/s

Abbildung 2-17: Geschwindigkeitsprofile / dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m$ , Messungen 02 bis 05 - Hufeisenprofil

### 2.3.4.2.3 Gestörtes Geschwindigkeitsprofil – Messung 06

Bei Messung 06 wurde, analog zum Rechteckprofil, durch das Aktivieren unmittelbar benachbarter Strahlventilatoren (Entfernung Lüfter/Messnetz weniger als 40 m) ein stark beeinflusstes Geschwindigkeitsfeld im Bereich des Messaufbaus erzeugt.

Es wurde wiederum ein Strömungsprofil in Form eines dimensionslosen Isotachenfeldes ( $v_i/v_m$ ) erstellt (siehe hierzu Abbildung 2-18), die Blickrichtung ist dabei entgegen der Fahrt- und Strömungsrichtung gerichtet.

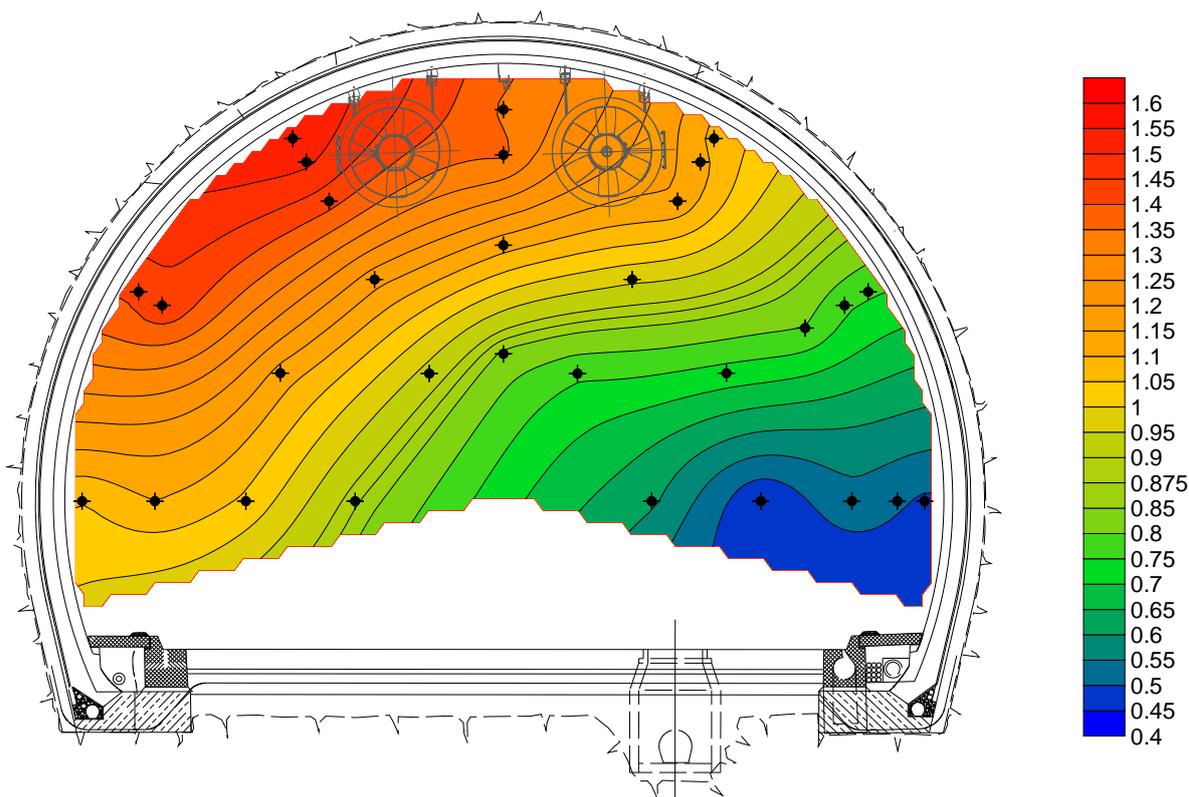


Abbildung 2-18: beeinflusstes Strömungsprofil, dimensionslose Isotachen  $v_i/v_m - v_m = 6,36$  m/s

Das Profil zeigt einen starken Geschwindigkeitsgradienten in vertikaler Richtung. Die leichte ‚Linksneigung‘ des Verlaufs resultiert aus der recht stark ausgeprägten Rechtskurve des Falkenbergtunnels im Bereich des Messaufbaus.

Die höchsten Geschwindigkeiten werden im linken oberen Bereich erzielt, während in der rechten unteren Hälfte deutlich niedrigere örtliche Geschwindigkeiten erzielt werden. Grund hierfür ist, wie bereits beim Rechteckquerschnitt zu beobachten war, die hohe Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren, welche im oberen Bereich der Tunnelfirste installiert sind. Während in den roten Bereichen Geschwindigkeiten von über 10 m/s gemessen wurden (dies entspricht einer lokalen Überhöhung der Geschwindigkeit gegenüber dem Mittel von über 60%), erreicht die örtliche Luftgeschwindigkeit im rechten unteren, blauen Bereich gerade einmal etwas über 3 m/s (was eine lokale Unterschreitung des Mittelwerts von bis zu 52% darstellt).

Das Verhältnis der (gemessenen) örtlichen Geschwindigkeit zur (errechneten) mittleren Geschwindigkeit liegt somit insgesamt, ganz ähnlich wie beim Rechteckprofil, im Bereich

zwischen 0,48 und 1,62. Der Vergleich zu den unbeeinflussten Messungen 01 bis 05 im Hufeisenprofil, bei welchen dieses Verhältnis relativ konstant zwischen 0,70 und 1,30 liegt, unterstreicht auch hier die starke Ungleichförmigkeit.

Der errechneten Ungleichförmigkeitsgrad U (siehe Kapitel 2.3.4.2.1) liegt mit 41,71%, wie bereits bei den Untersuchungen im Rechteckprofil festgestellt, deutlich über dem Grenzwert von 10%, das Geschwindigkeitsprofil muss im vorliegenden Fall als stark gestört bezeichnet werden.

Der Ungleichförmigkeitsgrad ist viel zu hoch wodurch für den vorliegenden Fall die Anzahl und Austeilung der Sonden somit streng genommen als nicht ausreichend bezeichnet werden muss, das Schwerlinienverfahren zur Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dürfte in diesem Fall eigentlich nicht angewendet werden.

Um, analog zum Rechteckprofil, jedoch trotzdem (zumindest rein qualitative) Vergleiche mit den (ebenfalls beeinflussten) Begleitmessungen durchführen zu können, wurde die mittlere Geschwindigkeit im Tunnelquerschnitt, unabhängig davon ausgewertet:

Tabelle 2-21: Zusammenfassung Messergebnisse, Hufeisenprofil – Messung 06

Messung	Netzmessung	LG 02	FVT 03	FVT 01	FVT 02	Mittelwert FVT 01/ 02
Messhöhe [mm]	-	4700	2840	4100-200	200-4100	-
Messwert [m/s]	-6,36	-5,48	-5,70	-5,17	-4,78	-4,47
Abweichung [%]	-	-13,83	-10,42	-18,67	-24,92	-21,80

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 2-21 dargestellt. Es zeigt sich auch im Hufeisenprofil, dass die Abweichungen in Summe sehr hoch ausfallen. Bei den Messungen über dem Lichtraumprofil (LG 02) und auf Höhe der Mittelachse (FVT 03) liegen diese zwischen -10 und -14%, bei den beiden doppelt-diagonalen Messungen (FVT 01/02) sogar zwischen knapp -19 und -25%. Die Mittelwertbildung der beiden gekreuzt angeordneten, doppelt-diagonalen Messanordnungen vermag das Ergebnis mit -22% nur marginal zu verbessern.

Der Grund für diese starken Abweichungen ist in der Lage der Messpfade und der Ausprägung des Geschwindigkeitsprofils zu finden. Die Messpfade der beiden doppelt-diagonalen Messungen FVT 01/02 liegen zur Gänze unterhalb des Querschnittsbereichs mit den überhöhten Geschwindigkeiten und unterschätzen die mittlere Geschwindigkeit im Profil daher recht deutlich. Die fix im Tunnel installierte Messung über dem Lichtraumprofil (LG 02) und die Begleitmessung auf Höhe der Mittelachse (FVT 03) erfassen diesen Bereich zumindest teilweise mit, was dazu führt dass die Unterschätzung in diesen beiden Fällen in etwa nur halb so hoch ausfällt.

Ähnlich wie bereits beim Kastenprofil zeigt sich, dass bei einem derart gestörten Geschwindigkeitsprofil eigentlich keine Einzelpunkt- oder Linienmessung dazu geeignet ist, die mittlere Luftgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt abzubilden.

## 2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigste Aufgabe der Tunnellüftung bei einem Brand ist es, die Rauchgase so rasch wie möglich vom Brandort weg zu transportieren und damit die Sichtbedingungen für flüchtende Personen so optimal wie möglich zu gestalten und diesen Zustand so lange wie möglich aufrecht zu erhalten. Dazu muss die vorherrschende Geschwindigkeit der Luft im Tunnel zu jedem Zeitpunkt so genau wie nur irgendwie möglich erfasst werden.

Dabei ist es vor allem wichtig die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt zu kennen. Die qualitativen Ansprüche an die Messeinrichtungen im Tunnel sind daher besonders hoch anzusetzen. Aus diesem Grund schreiben einschlägige Richtlinien (unter anderem die österreichische [RVS 09.02.31, 2014]) vor, dass im Rahmen der Inbetriebnahme einer Tunnelanlagen Referenzmessungen an jeder einzelnen Messanordnung durchzuführen sind. Ziel dieser Referenzmessungen ist es, einerseits die einwandfreie Funktion der installierten Geräte festzustellen und lokale Beeinflussungen auszuschließen bzw. im Bedarfsfall korrigieren zu können und andererseits sicherzustellen, dass die gemessene Geschwindigkeit auch tatsächlich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im betroffenen Tunnelquerschnitt entspricht. Darüber hinaus sollten die Geschwindigkeitsmessanlagen in regelmäßigen Abständen (spätestens alle 3 bis 5 Jahre) entsprechend nachreferenziert und überprüft werden. Allerdings gibt es in keiner der bzgl. Tunnelsicherheit führenden Richtlinien (D, A, CH) weitergehende Informationen darüber welche Referenzmessverfahren dafür herangezogen werden sollen bzw. wie bei solchen Messungen vorzugehen ist.

Für technische Strömungen in Luftkanälen hingegen existieren diesbezüglich ausführliche Normen und Richtlinien ([VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991]) welche zur Referenzierung und Abnahme ganz klar Netzmessungen im Kanalquerschnitt vorschreiben. Überträgt man diese Normen und Vorgehensweisen jedoch auf den gegenständlichen Anwendungsfall eines Straßentunnels so ergeben sich daraus einige Problemstellungen. Derartige Netzmessungen sind auf Grund der großen Querschnittsflächen im Tunnel (50 bis 100 m<sup>2</sup>) sehr aufwendig. Die dafür benötigte Ausrüstung ist, auf Grund der hohen Anzahl an vorzusehenden Messpunkten, sehr umfangreich, entsprechende Messungen sind daher auch kostenintensiv und der betroffenen Tunnel ist für Stunden völlig für den Verkehr zu sperren.

Eine einfache und deutlich weniger zeit- und kostenintensive Alternative stellt eine Referenzmessung mit Hilfe von streckenmittelnden Ultraschallanemometern dar. Die Ultraschallanemometer zur Referenzierung müssen dabei im Tunnelquerschnitt jedoch so angeordnet werden, dass damit sicher die mittlere Strömungsgeschwindigkeit erfasst wird. In den gegenständlichen Untersuchungen wurden daher insgesamt 3 unterschiedliche Messanordnungen in zwei repräsentativen Tunnelquerschnittstypen (Kasten- / Rechteckprofil und Hufeisenprofil) mit entsprechenden Netzmessungen gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] verglichen.

### 2.4.1 Zusammenfassung Netzmessung im Kasten- / Rechteckprofil

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem unbeeinflussten Strömungsprofil die doppelt-diagonale gekreuzt angeordnete Messung (FVT 01 und FVT 02) die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt am besten die auf Basis einer Netzmessung mit 32 Sonden, ausgeteilt und ausgewertet nach dem Log.-Tschebyschew-Verfahren ermittelten, mittleren Geschwindigkeit abbildet.

Die relativen Abweichungen zum Messnetz liegen dabei zwischen -1,55 und 5,88%. Absolut stellt dies Abweichungen zwischen -0,03 und +0,14 m/s dar. Unter Berücksichtigung der, seitens der Hersteller von streckengemittelten Ultraschallmessgeräten üblicherweise angegebenen, typischen Genauigkeit von  $\pm 0,2$  m/s bis  $\pm 0,3$  m/s stellt dies eine sehr gute

Übereinstimmung dar.

Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass bei leicht asymmetrischem Geschwindigkeitsverlauf (z.B. bedingt durch eine Kurve) eine einzelne doppelt-diagonale Messung zu etwas größeren Abweichungen führen kann. Für Referenzierungsmessungen mit hoher Anforderung an die Genauigkeit sollten daher immer zwei gekreuzte Messgeräte verwendet und der Mittelwert der beiden Messungen herangezogen werden. Dadurch können Asymmetrien im Strömungsprofil gut ausgeglichen werden.

Die einfach-diagonale Messung auf Höhe der horizontalen Mittelachse des Querschnitts weist mit +1,84 bis +10,31% etwas höhere relative Abweichungen auf. Absolut gesehen bedeutet dies Abweichungen zwischen +0,11 und +0,26 m/s, welche somit jedoch ebenfalls noch in der Größenordnung der Messgenauigkeit von streckenmittelnden Ultraschallanemometern liegen.

Die Messung über dem Lichtraumprofil, welche in einem Tunnel unter Verkehr die einzig mögliche fixe Einbausituation darstellt, hat mit -4,83 bis -13,04% bei allen Messungen die insgesamt größten Abweichungen gezeigt. Absolut liegen diese zwischen -0,22 bis -0,44 m/s. Dies ist, im Vergleich zur gekreuzten doppelt-diagonalen Messungen, zwar deutlich höher – berücksichtigt man jedoch die [RVS 09.02.31, 2014], welche eine Abweichung von  $\pm 0,3$  m/s zur Referenz zulässt, zeigt sich, dass die festgestellten Abweichungen weniger schwerwiegend sind, als die relativen Abweichungen zuerst vermuten lassen. Da eine andere, günstigere Situierung einer streckengemittelten Messung in einem Tunnel unter Verkehr ohnehin nicht möglich ist, muss dieser Fehler im Rahmen der Inbetriebnahme durch entsprechende Referenzmessungen erfasst und mit einer entsprechenden Korrektur versehen werden.

#### **2.4.2 Zusammenfassung Netzmessung im Hufeisenprofil**

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass, ein unbeeinflusstes Strömungsprofil vorausgesetzt, die einfach-diagonale Messanordnung auf Höhe der horizontalen Mittelachse die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt (ermittelt auf Basis einer Netzmessung mit 32 Sonden, ausgeteilt und ausgewertet nach dem Schwerlinienverfahren) am besten abgebildet hat. Die relativen Abweichungen zum Messnetz liegen dabei nur zwischen -0,27 und -1,32%. Absolut stellt dies Abweichungen zwischen -0,01 und -0,08 m/s dar. Unter Berücksichtigung der, seitens der Hersteller von streckengemittelten Ultraschallmessgeräten üblicherweise angegebenen, typischen Genauigkeiten von  $\pm 0,2$  bis  $\pm 0,3$  m/s, stellt dies eine sehr gute Übereinstimmung dar.

Die Messung über dem Lichtraumprofil, welche in einem Tunnel unter Verkehr die einzig mögliche fixe Einbausituation darstellt, hat mit relativen Abweichungen von -4,23 bis +0,33% ebenfalls eine recht gute Übereinstimmung gezeigt. Absolut liegen die Abweichungen zwischen -0,21 bis +0,01 m/s. Dies ist zwar etwas höher als bei der Messung auf Höhe der Mittelachse, liegt aber immer noch in der Größenordnung der Genauigkeit der verwendeten Messgeräte.

Die beiden doppelt-diagonalen Messungen liefern auf Grund des durch die ausgeprägte Rechtskurve insgesamt leicht schrägen Geschwindigkeitsverlaufs stark unterschiedliche Ergebnisse:

Bei einer der beiden Messungen liegen die relativen Abweichungen zwischen -1,94 und -3,58%, was eine insgesamt recht gute Übereinstimmung bedeutet. Absolut gesehen stellt dies Abweichungen von -0,04 bis -0,23 m/s dar, was jedoch ebenfalls noch im Bereich der typischen Messgenauigkeit des verwendeten Gerätetyps liegt.

Bei der zweiten Messung liegen die relativen Abweichungen zwischen -10,22 und -5,51%,

oder absolut ausgedrückt zwischen  $-0,13$  m/s und  $-0,61$  m/s. Dies ist deutlich höher als bei der gekreuzten Gegenmessung.

Die Mittelwertbildung dämpft diesen Effekt etwas ab, die relativen Abweichungen liegen dann zwischen  $-3,73$  und  $-6,99\%$  (bzw.  $-0,09$  und  $-0,42$  m/s). Trotz der Mittelwertbildung sind die Abweichungen höher als bei den anderen untersuchten Konfigurationen und liegen zudem zum Teil auch über den gemäß [RVS 09.02.31, 2014] zulässigen Abweichungen von  $\pm 0,3$  m/s.

Aus Abbildung 2-16 wird ersichtlich, warum die doppelt-diagonale gekreuzte Anordnung bei Hufeisenprofilen (im Gegensatz zum Rechteckprofil) merkbar schlechter abschneidet. Auf Grund der Neigung der Ulmen ist im Bereich der erhöhten Randstreifen (wo die Messköpfe üblicherweise auf Stativen aufgebaut werden) die Höhe für den oberen Messkopf begrenzt. Der Kreuzungspunkt der Diagonalen liegt daher deutlich unter dem Flächenschwerpunkt und unter der Mittelachse. Keine der beiden diagonalen Messpfade durchschneidet den Kern des Profils ausreichend. Die höheren Geschwindigkeiten werden somit zu wenig erfasst, und die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt wird entsprechend unterschätzt.

Die Untersuchungen im Kasten-/ Rechteckprofil haben gezeigt, dass die doppelt-diagonale, gekreuzte Messanordnung prinzipiell sehr gut dazu geeignet ist, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt zu erfassen und durch die implizierte Mittelwertbildung der beiden Messanordnungen zudem in der Lage ist Asymmetrien im Strömungsprofil gut auszugleichen.

Um die für Referenzmessungen erforderliche Genauigkeit auch im Hufeisenprofil zu erhalten, sollte bei diesem Verfahren daher die Höhe über Fahrbahnoberkante (FOK) der oberen Messköpfe angehoben werden in dem die Messanordnungen etwas in Richtung Fahrbahnmitte gerückt werden. Dadurch werden die resultierenden Diagonalen steiler und der Kreuzungspunkt rutscht in Richtung Flächenschwerpunkt des Tunnelquerschnitts (und somit auch des Kerns des Geschwindigkeitsfeldes). Damit sollten die Abweichungen auch beim doppelt-diagonalen Verfahren auf das sehr gute Niveau der beiden anderen untersuchten Konfigurationen reduziert werden können.

Kann eine Beeinflussung des Strömungsprofils (Asymmetrie bezogen auf die vertikale Achse) durch ausgeprägte Kurven im Vorfeld ausgeschlossen werden, so haben die Untersuchungen deutlich gezeigt, dass eine einfach-diagonale Messung auf Höhe des Flächenschwerpunkts die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ausreichend genau abbildet.

### 2.4.3 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen haben in beiden Querschnittstypen gezeigt, dass streckenmittelnde Ultraschallensensoren prinzipiell sehr gut dazu geeignet sind, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Tunnelquerschnitt zu erfassen und somit eine zulässige Alternative zu Netzmessungen darstellen.

Die relativen Abweichungen der gewählten Messanordnungen lagen in beiden Querschnittstypen über alle untersuchten Geschwindigkeitsstufen hinweg durchwegs im Bereich der Größenordnung der von den Herstellern angegebenen Messgenauigkeiten.

Auf Grund der sehr guten Ergebnisse im Kasten-/ Rechteckprofil und der Erkenntnisgewinne aus den Messungen im Hufeisenprofil hat sich herausgestellt, dass die doppelt-diagonale, gekreuzte Messkonfiguration prinzipiell am besten für Referenzmessungen mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit und zur Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt geeignet ist. Grund hierfür ist vor allem die implizierte Mittelwertbildung durch Verwendung zweier gegengleich angeordneter

Messpfade, welche vorhandene Asymmetrien im Geschwindigkeitsfeld ausgleichen können. Wichtig ist dabei jedoch, dass der Kreuzungspunkt der beiden Messpfade im Nahbereich des Flächenschwerpunkts zu liegen kommt. Andernfalls, dies haben die Messungen im Hufeisenprofi deutlich gezeigt, kann es bei dieser Anordnung zu einer Unterschätzung der mittleren Geschwindigkeit im Querschnitt kommen, welche insbesondere in Verbindung mit Asymmetrien im Strömungsprofil (z.B. durch eine Kurve im Messbereich) dazu führen kann dass der Messfehler größer wird als zulässig ist.

Die Darstellung der Strömungsprofile zeigt zudem klar, dass Einzel- oder Mehrpunktmessungen (sofern es sich nicht um ein Messnetz mit entsprechender Dichte handelt) als Referenzmessung ungeeignet sind, solange man die Geschwindigkeitsverteilung im zu untersuchenden Querschnitt nicht genau kennt.

Es existieren Ansätze die Geschwindigkeitsverteilung auf Basis einer 3D-CFD Simulation zu errechnen, und diese dann mit Hilfe einer Einzelpunktmessung zu ‚skalieren‘. Aus dem skalierten, aber immer noch simulierten, Geschwindigkeitsfeld wird dann die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt errechnet. Betrachtet man jedoch die ermittelten Strömungsprofile mit Simulationsergebnisse, so zeigen sich durchaus relevante Abweichungen. Bedingt sind diese in erster Linie durch Randbedingungen (wie z.B. Einbauten im Tunnel, Kurvenradien, unterschiedliche Rauigkeiten an Wand und Fahrbahn, etc...) welche nur sehr schwer und mit hohem Aufwand in einer Simulation ausreichend berücksichtigt werden können. Als Referenzmessung sollten solche Verfahren daher, auf Grund der hohen Anforderungen, nicht herangezogen werden.

Die Aufzeichnung und Auswertung/Darstellung eines bewusst beeinflussten Geschwindigkeitsprofils (durch aktivieren von Strahlventilatoren in unmittelbarer Nähe zum Messnetz) hat gezeigt, wie stark sich die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt dabei gegenüber dem unbeeinflussten Fall verändert. Der errechnete Ungleichförmigkeitsgrad lag deutlich über der Grenze von 20%, ab welcher von einer stark gestörten Geschwindigkeitsverteilung auszugehen ist. Keine der untersuchten Konfigurationen konnte noch akzeptable Abweichungen zur Netzmessung liefern, die absoluten Abweichungen betragen um oder über 1,0 m/s und lagen somit deutlich über den geforderten Genauigkeiten. Dies zeigt recht deutlich wie empfindlich Geschwindigkeitsmessungen (unabhängig vom Messprinzip), trotz der an und für sich sehr robusten Messprinzipien und -geräte, auf derartige äußere Beeinflussungen sind. Bei der Situierung der Messstellen ist daher, von der Planungs- über die Ausführungs- bis hin zur Inbetriebnahmephase, größte Sorgfalt nötig ist. Zudem ist bei der Durchführung von Referenzmessungen ganz besonders darauf zu achten, dass diese zwar nach Möglichkeit in der Nähe der zu überprüfenden Messanordnung durchgeführt werden, eine Beeinflussung der Referenzmessgeräte jedoch unbedingt vermieden werden muss. Nur dann kann, bei einer festgestellten Abweichung/Beeinflussung und mangels anderer Alternativen, gegebenenfalls eine Korrektur der zu überprüfenden Messanordnung an Hand der Referenzmessung erfolgen. Das Ziel sollte jedoch in jedem Fall immer eine möglichst unbeeinflusste (und nach Möglichkeit unkorrigierte) Geschwindigkeitsmessung im Tunnel sein.

### 3 Messung des effektiv eingebrachten Schubs im Tunnel

#### 3.1 Allgemeines

Um die Längsgeschwindigkeit im Tunnel beeinflussen (also entweder beschleunigen oder abbremsen zu können), muss eine Kraft auf die Luftsäule aufgebracht werden. Dies erfolgt durch das Einbringen von Schub. Die zurzeit häufigsten Methoden Schub einzubringen sind Strahlventilatoren und Injektionssysteme, basierend auf dem Saccardo-Prinzip.

Bei Injektionssystemen / Saccardodüsen wird Luft von außen mit hoher Geschwindigkeit und unter einem gewissen Winkel in den Tunnelfahrraum eingeblasen. Der horizontale Anteil des Impulses kann zum Teil dazu genutzt werden, die Luftsäule zu beschleunigen bzw. abzubremesen. Gleichzeitig wird dem System dadurch aber natürlich auch zusätzlich Luftmasse zugeführt.

Bei Strahlventilatoren wird Luft aus dem Fahrraum vom Ventilator angesaugt und auf der gegenüberliegenden Seite mit hoher Geschwindigkeit wieder ausgeblasen. Dieser Luftstrahl weitet sich danach kegelförmig über eine gewisse Strecke auf und gibt dabei einen Teil seines Impulses an die deutlich langsamere Luftsäule im Tunnel ab.

In beiden Fällen ist es jedoch so, dass immer nur ein Teil des theoretisch möglichen Schubs zur Beschleunigung bzw. zum Abbremsen genutzt werden kann. Die Differenz ist durch diverse Verluste bedingt und wird in der Regel durch entsprechende Wirkungsgrade ausgedrückt.

Bei Injektions- bzw. Saccardosystemen wird die Differenz zwischen theoretisch (gemäß Impulssatz) maximal möglichem und tatsächlich eingebrachtem Schub durch den sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten angegeben. Theoretische Untersuchungen und Berechnungen zur Bestimmung des Impulsumsetzungskoeffizienten finden sich in [Pospisil, et al., 2010] sowie in [Sutterlüty, 2012]. Am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz wurden diesbezüglich auch bereits erste Messungen im Felbertauerntunnel [Sturm, Beyer, & Bacher, 2013] durchgeführt, die als Basis für das in dieser Arbeit vorgestellte Messkonzept gedient haben.

Die theoretische erzielbare Impulsumsetzung eines Strahlventilators wird von [Meidinger, 1964] bzw. [Truckenbrodt, 2008] in der Literatur ausführlich beschrieben. Die Differenz zwischen dem Standschub (gemessen auf einem normierten Prüfstand bei einer definierten Referenzluftdichte und bei stehender Umgebungsluft) und dem effektiv eingebrachten Schub ist dabei durch eine Verkettung mehrerer Faktoren definiert. Die wesentlichsten Einflussfaktoren stellen die in der Regel von der festgelegten Referenz abweichende Luftdichte im Tunnel, die im Tunnel bereits vorherrschende Strömung und die reale Einbausituation der Strahlventilatoren (Coanda-Effekt / erhöhte Wandreibung durch hohe Strahlgeschwindigkeit bei zu geringen Wandabständen) dar. Während die Schubminderung durch abweichende Luftdichte und Grundgeschwindigkeit relativ leicht auf Basis bekannter Größen errechnet werden kann, stellen die Verluste rein bedingt durch den Einbau selbst (,Installations- oder Einbaufaktor‘ zu Folge der erhöhten Wandreibung / Coanda-Effekt) eine in der Regel unbekannt Größe dar.

In der Planungsphase müssen diese Faktoren bei der Dimensionierung der Lüftungsanlage selbstverständlich berücksichtigt werden, um eine ausreichende Leistung gewährleisten zu können. Diese Faktoren stellen in dieser Projektphase jedoch lediglich eine Annahme dar. Für gängigere Einbaukonstellationen wird dabei oft auf Erfahrungswerte bzw. Literaturwerte zurückgegriffen.

Diese Literaturwerte stammen zumeist aus Modellversuchen und wurden in einigen Fällen speziell für die Anordnung von Strahlgebläsen in Tunnelquerschnitten durchgeführt:

- [Kempf, 1965]
- [Rohne, The Friction Losses on Walls Caused by a Row of Four Parallel Jet Flows, 1988]
- [Rohne, The Friction Losses on Walls Caused by the Jet Flows of Booster Fans, 1979]
- [Rohne, Über die Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläse., 1964]

Die Erfahrungen bei Inbetriebnahmen von Tunnelanlagen zeigt jedoch dass die in der Literatur zu findenden ‚Installations- / Einbaufaktoren‘ von Strahlventilatoren in der Regel etwas zu ‚optimistisch‘ sind und die tatsächlich erzielbaren effektiven Schübe meist etwas geringer sind, als es diese zu Folge der Literaturwerte eigentlich sein sollte [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016].

Die uneingeschränkte Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Verhältnisse in einem realen Tunnel ist somit nicht gewährleistet, zudem werden immer öfter Anordnungen (Einbau in Nischen oder Deckenunterzügen, Anordnung in Ventilatorbatterien, Verkürzung der Abstände der Ventilatoren zueinander, etc.) umgesetzt, für die es bislang zudem weder Erfahrungswerte noch Modelluntersuchungen gibt.

Eine wichtige Aufgabenstellung im Rahmen der Inbetriebnahme einer Tunnellüftungsanlage ist es daher, den effektiv einbringbaren Schub in das System zu ermitteln. Dadurch kann unmittelbar nach Inbetriebnahme (IBN) der Anlage überprüft werden, ob der in der Planungsphase angenommene Schub auch tatsächlich aufgebracht werden kann. Sollte dies nicht der Fall sein, so muss geprüft werden welche Auswirkungen der Minderbefund auf das gesamte System hat.

Die durch die Messungen ermittelten Impulsumsetzungskoeffizienten dienen zudem zur nachträglichen Verifikation der im Rahmen der Planung angenommenen Werte und können als solide Planungsbasis für künftige Planungsprojekte herangezogen werden. Dadurch können bei zukünftigen Projekten Unsicherheiten und Fehler durch falsche Faktoren vermieden werden.

Bei komplexeren Aufgabenstellungen werden zunehmend auch CFD Simulationen zur Bestimmung dieser Faktoren herangezogen. So wurde zum Beispiel im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz versucht für die Standardbaugruppen von Ventilatoren die in Tunneln im ASFiNAG-Straßennetz zum Einsatz kommen, die Einbaufaktoren für unterschiedliche Tunnelquerschnitte und verschiedene Konfigurationen mittels Strömungssimulation rechnerisch zu ermitteln [Galehr, 2012].

Am IVT wurden zudem ähnliche Messungen, wie sie in der gegenständlichen Arbeit beschrieben werden, im Tunnel Niklasdorf durchgeführt, um den effektiv eingebrachten Schub zu messen. Parallel dazu wurde ein 3D-CFD-Modell entwickelt, welches in weiterer Folge auf Basis und mit Hilfe der erzielten Messergebnisse entsprechend angepasst und validiert wurde [Saurwein, 2014].

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und einer weiteren Messserie im Bosrucktunnel wurden weitergehende Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt, welche bereits zu einer recht umfangreichen Sammlung an Simulationsergebnissen geführt haben [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016].

Die bislang am IVT gewonnen Erkenntnisse und Erfahrungen in diesen beiden Bereichen sind bei der Ausarbeitung der in dieser Arbeit dargestellten Messkonzepte eingeflossen und die erzielten Messergebnisse werden wiederum dafür verwendet die bestehenden CFD- und Berechnungsmodelle weiter zu verbessern.

### 3.2 Aufgabenstellung/Ziel der Messungen

Für die Messung des eingebrachten Schubs gibt es, z.B. im Gegensatz zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit (siehe Kapitel 2 dieser Arbeit), keine standardisierten Verfahren oder Vorschriften, welche einen Anhaltspunkt für ein Messkonzept oder die zu wählende Vorgehensweise liefern.

Das Ziel der gegenständlichen Untersuchungen ist es daher, für die beiden derzeit gängigsten Systeme zur Beeinflussung der Längsströmung (Frischluftimpulsklappen und Strahlventilatoren) am Beispiel des Karawankentunnels zu zeigen, wie auf relativ einfache Art und Weise der effektiv einbringbare Schub im Rahmen der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage gemessen und ermittelt werden kann.

Für Impulssysteme und Strahlventilatoren wird jeweils ein Messkonzept gezeigt, welches, mit geringen anlagenspezifischen Anpassungen, auf jeden beliebigen Tunnel übertragbar ist. Die dargestellten Messkonzepte wurden für die gegenständlichen Untersuchungen dahingehend erweitert, dass auch der theoretisch maximal erzielbare Schub des betrachteten Impulssystems bzw. der Strahlventilatoren erfasst wird.

Die Zielsetzung der durchgeführten Messungen im Detail:

#### Frischluftimpulssysteme

- Erstellen eines Messkonzeptes zur Ermittlung des effektiv eingebrachten Schubs
- Bestimmung der zu erwartenden Messunsicherheiten
- Messung der Strecken- und Reibungsverluste zur späteren Korrektur der Messergebnisse
- Messung des effektiv eingebrachten Schubs für folgende Betriebszustände:
  - *Beschleunigung der Grundströmung bei Klappenwinkel  $0^\circ < a < 90^\circ$*
  - *Abbremsen der Grundströmung bei Klappenwinkel  $0^\circ < a < 90^\circ$*
  - *Beschleunigung der Grundströmung bei Klappenwinkel  $90^\circ < a < 180^\circ$*
  - *Abbremsen der Grundströmung bei Klappenwinkel  $90^\circ < a < 180^\circ$*
- Messung aller erforderlicher Größen zur Ermittlung des theoretisch maximal einbringbaren Schubs
- Gegenüberstellung effektiv eingebrachter Schub zu theoretisch einbringbarer Schub
- Ermittlung der Impulsumsetzungskoeffizienten
- Vergleich der ermittelten Impulsumsetzungskoeffizienten mit Literaturwerten

#### Strahlventilatoren

- Erstellen eines Messkonzeptes zur Ermittlung des effektiv eingebrachten Schubs
- Bestimmung der zu erwartenden Messunsicherheiten
- Messung der Strecken- und Reibungsverluste zur späteren Korrektur der Messergebnisse
- Messung des effektiv eingebrachten Schubs für unterschiedliche Schaltzustände
- Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Strahlventilator zur Ermittlung des theoretisch maximalen Schubs
- Gegenüberstellung effektiv eingebrachter Schub zu theoretisch einbringbarer Schub
- Ermittlung des Einbau- bzw. Installationsfaktors

### 3.3 Schubeinbringung von Frischluftimpulssystemen

#### 3.3.1 Messaufbau und Messprogramm

Die Messungen wurden in der Bestandsröhre des Karawankentunnels durchgeführt. Dieser bekam im Rahmen einer Sanierung der Lüftungsanlage in den Jahren 2014/2015 unter anderem an beiden Portalen (Nord und Süd) jeweils ein Frischluftimpulssystem nachgerüstet, welches zusätzlich zu den Strahlventilatoren dazu dienen soll die Längsgeschwindigkeit im Tunnel beeinflussen und einregeln zu können. An beiden Systemen wurden Messungen zur Bestimmung des effektiv eingebrachten Schubs durchgeführt.

##### 3.3.1.1 Messaufbau

Der Messaufbau wurde in Anlehnung an bereits im Felbertauerntunnel vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz durchgeführte Messungen [Sturm, Beyer, & Bacher, 2013] gewählt, Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Darstellung für das Frischluftimpulssystem SÜD des Karawankentunnels.

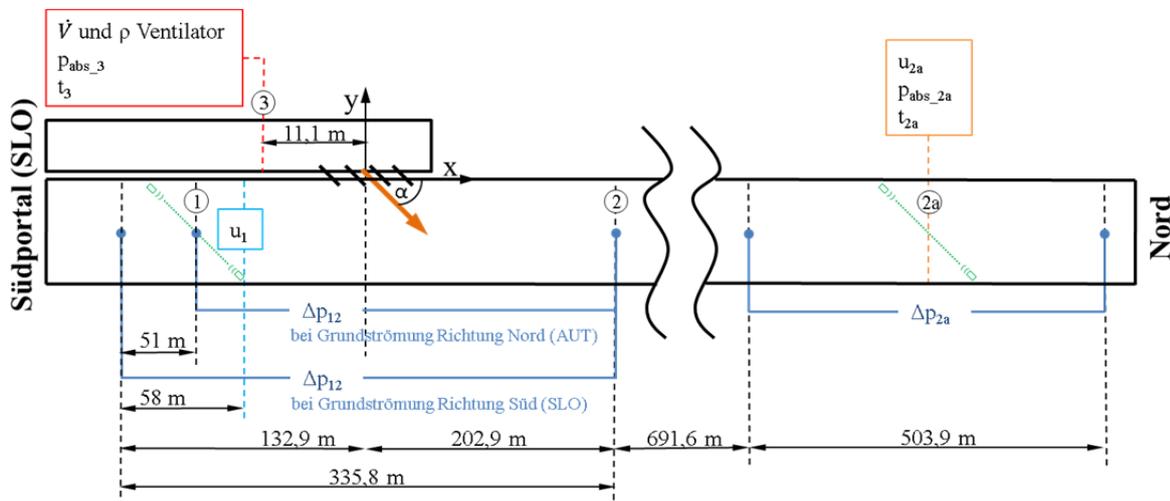


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Messaufbaus – Frischluftimpulssystem SÜD

Lage und Einbau der beiden Frischluftimpulssysteme im Karawankentunnel sind an beiden Portalen sehr ähnlich, der Messaufbau erfolgte daher bei beiden Systemen weitestgehend gleich. Eine schematische Darstellung des analogen Messaufbaus am Frischluftimpulssystem NORD des Karawankentunnels ist in Abbildung 3-2 enthalten.

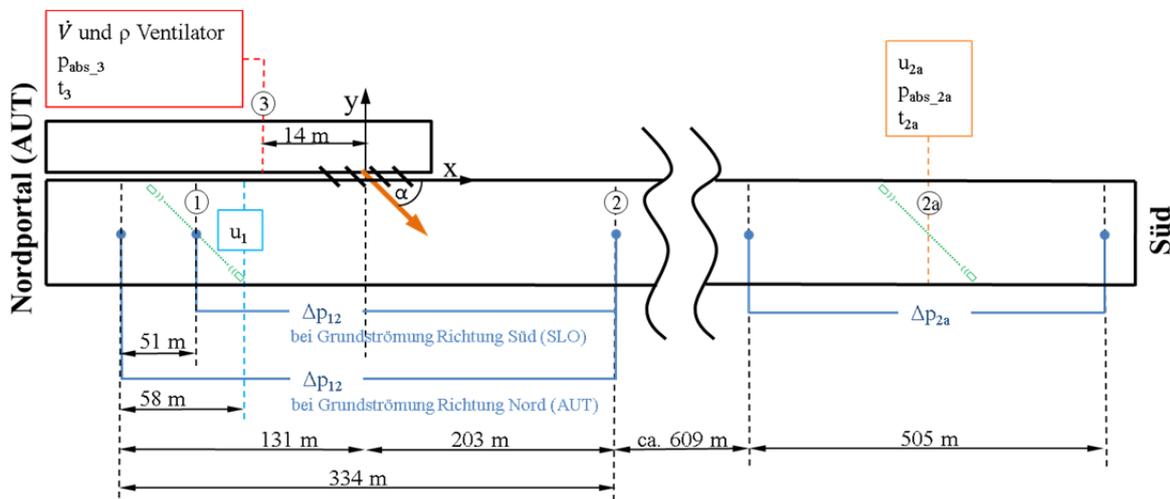


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Messaufbaus – Frischluftimpulssystem NORD

Bei der Messung der Druckdifferenz über die Frischluftimpulsklappe galt es darauf zu achten, dass die Messpunkte stromauf- und stromabwärts der Klappe jeweils im ungestörten (entwickelten) Bereich der Strömung liegen.

Da der Abstand der Impulsklappen zum Portal in beiden Fällen jedoch nur knapp 130 bis 140 m beträgt musste gleichzeitig berücksichtigt werden, dass bei einer Grundströmung in Richtung Tunnelmitte die Messungen nicht durch das Einströmen über das jeweilige Portal beeinflusst wird. Für Grundströmungen in Richtung Tunnelmitte wurde daher der äußere, portalnähere Messpunkt (1) für die statische Druckdifferenz über die Impulsklappe  $\Delta p_{12}$  gegenüber den Messungen bei Grundströmung Richtung Portal um ca. 50 m in den Tunnel hinein verschoben.

Für Grundströmungen in Richtung Portal und Richtung Tunnelmitte weicht der Messaufbau bzgl. der Messlängen daher bei beiden Frischluftimpulsklappen etwas voneinander ab.

Der Messpunkt in Richtung Portal (2) befindet sich jeweils ca. 200 m (unabhängig von der Grundströmung) und der Messpunkt in Richtung Tunnelmitte (1) jeweils ca. 130 m (bei Grundströmung in Richtung Portal) bzw. ca. 80 m (bei Grundströmung in Richtung Tunnelmitte) von der Mittelachse der Frischluftimpulsklappe entfernt.

Die genauen Abstände und Messlängen können den schematischen Darstellungen des Messaufbaus in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 entnommen werden.

Die gemessene statische Druckdifferenz  $\Delta p_{12}$  beinhaltet die Druckerhöhung die das Impulssystem im Fahrraum bewirkt. Aus ihr kann in weiterer Folge der effektiv durch das Frischluftimpulssystem eingebrachte Schub errechnet werden.

Zur Ermittlung der Rohrreibungszahl wurde eine weitere Differenzdruckmessung ( $\Delta p_{2a}$ ), ca. 800 m bzw. 900 m in Richtung Tunnelmitte von der Impulsklappe entfernt, in einem ungestörten Tunnelabschnitt ohne Nischen und Buchten errichtet.

Alle statischen Druckdifferenzen wurden mit Differenzdruckmessdosen der Firma Halstrup & Walcher aufgezeichnet.

Die Länge der Reibungsmessstrecke  $L_{2a}$  betrug bei beiden Messungen ca. 505 m, ungefähr in der Mitte der Messstrecke wurde die Längsgeschwindigkeit (2a) mit Hilfe eines streckenmittelnden Ultraschalllaufzeitdifferenz- Messgerätes der Firma SICK gemessen.

Zusätzlich wurde die Strömungsgeschwindigkeit am Messpunkt (1) ca. 80 m von der Impulsklappe in Richtung Portal mit Hilfe eines weiteren, streckenmittelnden Ultraschalllaufzeitdifferenz- Messgerätes der Firma DURAG erfasst.

Zur Ermittlung der Luftdichte während den Messungen wurden der Absolutdruck mit einem temperaturkompensierten Präzisionsbarometer der Fa. Kroneis sowie die Temperatur mithilfe eines kalibrierten Temperaturfühlers, ebenfalls von der Fa. Kroneis an den Messpunkten (2a) und (3) gemessen.

Die Messunsicherheiten der verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

### 3.3.1.2 Messgeräte

Die für die Messungen verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 3-1 aufgelistet. Zudem finden sich in dieser Tabelle die Messunsicherheiten und deren Messbereiche wieder.

Tabelle 3-1: Auflistung verwendeter Messgeräte – Schubmessung Frischluftimpulssysteme

Messwert	Messgröße	Messgerät	Messbereich	Messunsicherheit
$u_1$	Geschwindigkeit	DURAG (D-FL 210T)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,2$ m/s
$\Delta p_{12}$	Differenzdruck	Halstrup & Walcher P26	-500 bis +500 Pa	$\pm(0,5\%* + 0,3$ Pa)
$p_{abs\_3}$	Absolutdruck	Kroneis (Barogebber Type 315K)	850 bis 1050 hPa	$\pm 0,5$ hPa
$t_3$	Temperatur	Kroneis	-35 bis +45 °C	$\pm 0,15$ °C
$u_{2a}$	Geschwindigkeit	SICK (FLAWSIC 200)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,1$ m/s
$\Delta p_{2a}$	Differenzdruck	Halstrup & Walcher P26	0 bis +500 Pa	$\pm(0,5\%* + 0,3$ Pa)
$p_{abs\_2a}$	Absolutdruck	Kroneis (Barogebber Type 315K)	850 bis 1050 hPa	$\pm 0,5$ hPa
$t_{2a}$	Temperatur	Kroneis	-35 bis +45 °C	$\pm 0,15$ °C

\*des Messwerts

### 3.3.1.3 Messprogramm

Es wurde bei jeder Impulsklappe zu Beginn eine Reibungsmessung (R) durchgeführt. Dazu wurde eine möglichst hohe Grundströmung mit den Strahlrühfern sowie den beiden Frischluftimpulssystemen eingestellt, um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis bei der Druckmessung zu erhalten und den Messfehler gering zu halten.

Bei den darauf folgenden Differenzdruckmessungen zur Bestimmung der Schubeinbringung der Impulsklappe wurde darauf geachtet, dass es zu **keiner Rückströmung (Volumenstromaufteilung)** im Bereich der Impulsklappe kommt, um den (was den Impulsumsetzungskoeffizienten betrifft) ungünstigsten Fall untersuchen zu können.

Es wurden für jedes Impulssystem folgende Zustände vermessen:

- 1) *Beschleunigung der Strömung bei Grundströmung in Richtung Tunnelmitte*
- 2) *Abbremsen der Strömung bei Grundströmung in Richtung Tunnelmitte*
- 3) *Beschleunigen der Strömung bei Grundströmung in Richtung Portal*
- 4) *Abbremsen der Strömung bei Grundströmung in Richtung Portal*

Gemessen wurde jeweils die statischen Differenzdrücke  $\Delta p_{12}$  über das Impulssystem im Fahrraum und  $\Delta p_{31}/\Delta p_{32}$  zwischen Zuluftkanal und Fahrraum sowie über die Reibungsmessstrecke  $\Delta p_{2a}$ . Zusätzlich wurden die Längsgeschwindigkeiten  $u$  im Tunnel vor (1) und nach (2a) der Impulsklappe gemessen.

Gleichzeitig wurden der Absolutdruck  $p_{abs}$  und die Lufttemperatur  $t$  im Zuluftkanal (3) sowie im Bereich der Geschwindigkeitsmessung (2a) aufgezeichnet.

Die zu Beginn durchgeführte Reibungsmessung dient dazu, die anschließend folgenden Differenzdruckmessungen  $\Delta p_{12}$  über das Impulssystem entsprechend um die reinen Verluste der Messstrecke entsprechend korrigieren zu können. In Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 sind die durchgeführten Messungen aufgelistet.

Alle Messwerte wurden kontinuierlich aufgezeichnet, wobei die Aufzeichnungsfrequenz der Geschwindigkeitsmessung 3 Hz und die der übrigen Messwerte 1 Hz beträgt. Nach Erzielung eines stationären Strömungszustandes wurden die Messgrößen über eine Dauer von etwa 10 Minuten aufgezeichnet und anschließend die einzelnen Werte über diese Dauer gemittelt und für die Bestimmung des eingebrachten Schubes des jeweiligen Impulssystems ausgewertet. Die Messung zur Bestimmung der Tunnelreibung wurde nach Erhalt eines stationären Strömungszustandes etwa 20 Minuten lang aufgezeichnet.

Tabelle 3-2: Auflistung der durchgeführten Messungen – Frischluftimpulssystem SÜD

Messung	Strömung	Fall	Impulsklappe		Volumenstrom Zuluft*
	Richtung		Stellung	Winkel [°]	Sollwert [m <sup>3</sup> /s]
R	Nord / AUT	Reibung	-	-	-
1	Nord / AUT	Beschleunigung	Süd / SLO	30	140
2	Nord / AUT	Abbremsen	Nord / AUT	145	140
3	Süd / SLO	Beschleunigung	Nord / AUT	145	140
4	Süd / SLO	Abbremsen	Süd / SLO	30	140

\*... gemessen am Zuluftventilator

Tabelle 3-3: Auflistung der durchgeführten Messungen – Frischluftimpulssystem NORD

Messung	Strömung	Fall	Impulsklappe		Volumenstrom Zuluft*
	Richtung		Stellung	Winkel [°]	Sollwert [m <sup>3</sup> /s]
R	Süd / SLO	Reibung	-	-	-
1	Süd / SLO	Beschleunigung	Süd / SLO	30	140
2	Süd / SLO	Abbremsen	Nord / AUT	145	140
3	Nord / AUT	Beschleunigung	Nord / AUT	145	140
4	Nord / AUT	Abbremsen	Süd / SLO	30	140

\*... gemessen am Zuluftventilator

### 3.3.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren

#### 3.3.2.1 Berechnung des effektiv eingebrachten Schubs

##### 3.3.2.1.1 Berechnung der Luftdichte

Die während den Messungen vorherrschende Luftdichte  $\rho$  wurde aus den in den Ebenen 3 und 2a (siehe Abbildung 3-1 bzw. Abbildung 3-2) gemessenen Absolutdrücken  $p_{\text{abs}_3}$  und  $p_{\text{abs}_{2a}}$  sowie Temperaturen  $t_3$  und  $t_{2a}$  mit nachfolgender Gleichung (3-1) berechnet:

$$\rho_{3,2a} = \frac{p_{\text{abs}_{3,2a}}}{R_L \cdot (273,15 + t_{3,2a})} \quad (3-1)$$

$\rho_{3,2a}$	Luftdichte (Ebene 3 bzw. 2a)	in [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_{\text{abs}_{3,2a}}$	Absolutdruck (Ebene 3 bzw. 2a)	in [Pa]
$R_L$	Gaskonstante Luft; <b>287,058 J/kg K</b>	in [J/kg K]
$t_{3,2a}$	Temperatur (Ebene 3 bzw. 2a)	in [°C]

Die Berechnung der Luftdichte nach Gleichung (3-1) basiert auf der Annahme, dass die Tunnelluft als ideales Gas betrachtet werden kann.

Der gewählte Wert für die Gaskonstante  $R_L$  von 287,058 J/kgK gilt nur für trockene Luft (relative Feuchte R.H. = 0%). Die Gaskonstante für feuchte Luft hängt von der relativen Luftfeuchte  $\phi$  ab und weicht geringfügig von der Gaskonstante für trockene Luft ab. Der mögliche Fehler liegt jedoch in einer Größenordnung, die keinen relevanten Einfluss auf die weiterführenden Berechnungen und Auswertungen hat.

##### 3.3.2.1.2 Berechnung der Strömungsverluste in der Messstrecke

Mit der so errechneten Luftdichte kann in weiterer Folge die Rohrreibungszahl  $\lambda$  der Messstrecke (2a) auf Basis der gemessenen Differenzdrücke über die Messstrecke gemäß folgender Gleichung (3-2) berechnet werden:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p_{2a} \cdot D_{h2a}}{\rho_{2a} \cdot u_{2a}^2 \cdot L_{2a}} \quad (3-2)$$

$\lambda$	Rohrreibungszahl	in [-]
$L_{2a}$	Messstrecke (2a) zur Bestimmung der Streckenverluste	in [m]
$\Delta p_{2a}$	Gemessene Druckdifferenz über die Messstrecke $L_{2a}$	in [Pa]
$u_{2a}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit (Ebene 2a)	in [m/s]
$D_{h2a}$	Hydraulischer Durchmesser der Ebene 2a; <b>7,11 m</b>	in [m]
$\rho_{2a}$	Luftdichte (Ebene 2a)	In [kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.3.2.1.3 Berechnung des eingebrachten Schubs

Die Druckerhöhung  $\Delta p_{12}$  zwischen den Ebenen 1 und 2 enthält auch die Streckenverluste (Reibung) innerhalb dieser Messstrecke. Um auf die tatsächliche Druckdifferenz (rein bedingt durch das Impulssystem) zu gelangen, muss diese daher entsprechend korrigiert werden.

In Abbildung 3-3 ist der idealisierte (durchgezogene Linie) und der reale (strichpunktierte Linie) statische Druckverlauf eines Luftteilchens, welches unter der Impulsklappe hindurchströmt, für den Fall der Beschleunigung der Grundströmung schematisch dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die über das Impulssystem gemessene Druckdifferenz  $\Delta p_{12}$ , bedingt durch die Streckenverluste (Reibung) vor und nach der Impulsklappe geringer ist, als die tatsächlich bewirkte Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{FRIK}}$ .

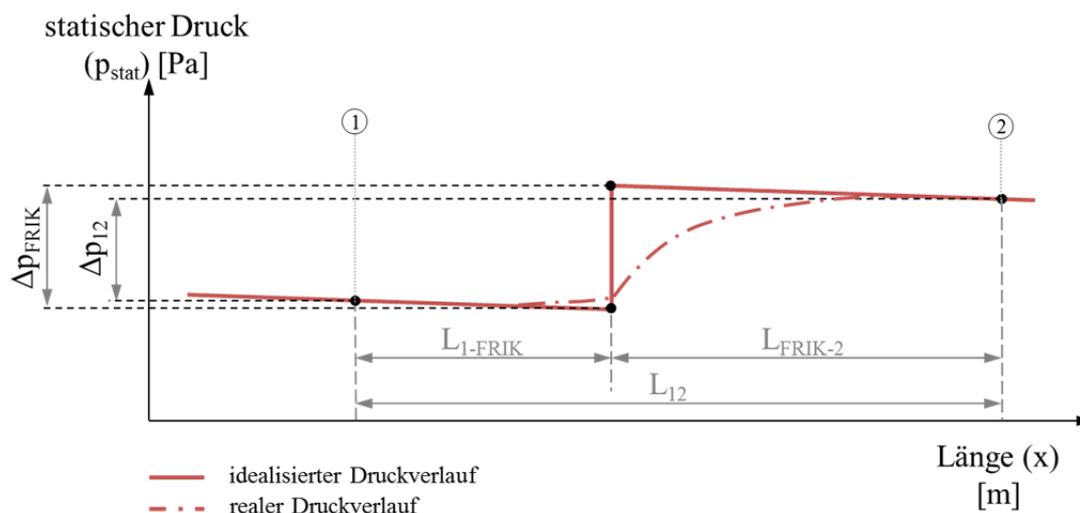


Abbildung 3-3: statischer Druckverlauf eines Teilchens das unter der Impulsklappe durchströmt (real / ideal) - Beschleunigung der Grundströmung, modifiziert nach [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016]

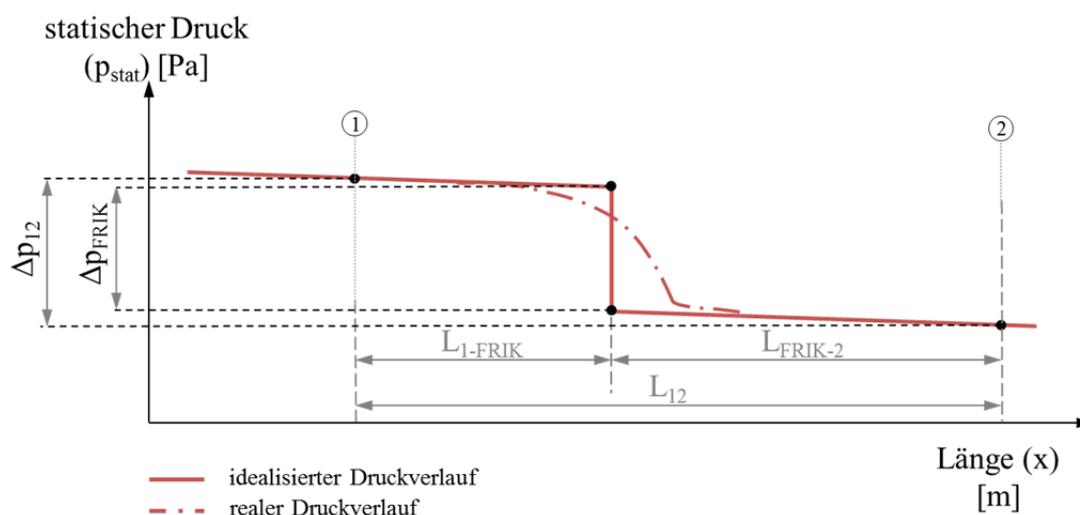


Abbildung 3-4: statischer Druckverlauf eines Teilchens das unter der Impulsklappe durchströmt (real/ideal) für Abbremsen der Grundströmung, modifiziert nach [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016]

In Abbildung 3-4 sind die gleichen statischen Druckverläufe für den Fall des Abbremsens der Grundströmung schematisch dargestellt. Hier liegt der Fall genau umgekehrt, die gemessene Druckdifferenz ist reibungsbedingt etwas höher als jene die tatsächlich durch das Impulssystem hervorgerufen wird.

Daraus wird ersichtlich, dass bei einer Beschleunigung der Grundströmung (jeweils Messungen 1 und 3) die gemessene Druckdifferenz  $\Delta p_{12}$  um die beiden Reibungsanteile (über die Streckenteile  $L_{1-FRIK}$  und  $L_{FRIK-2}$ ) erhöht und im Abbremsfall (jeweils Messungen 2 und 4) entsprechend verringert werden muss, um die tatsächliche Druckerhöhung  $\Delta p_{FRIK}$  durch das Frischluftimpulssystem zu erhalten (Gleichung (3-3)).

$$\Delta p_{FRIK} = \Delta p_{12} \mp \left[ \left( \lambda \cdot \frac{L_{1-FRIK}}{D_{h1}} \right) \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot u_1 + \left( \lambda \cdot \frac{L_{FRIK-2}}{D_{h2}} \right) \cdot \frac{\rho_2}{2} \cdot u_{2a} \right] \quad (3-3)$$

$\Delta p_{FRIK}$	Druckerhöhung durch Impulsklappe	in [Pa]
$\Delta p_{12}$	Gemessene Druckdifferenz zwischen Ebene 1 und 2	in [Pa]
$\lambda$	Rohrreibungszahl aus Reibungsmessung	in [-]
$L_{1-FRIK}$	Abstand Messebene 1 bis Mitte Impulsklappe	in [m]
$L_{FRIK-2}$	Abstand Mitte Impulsklappe bis Messebene 2	in [m]
$D_{h1/2}$	Hydr. Durchmesser der Ebene 1 bzw. 2; <b>7,11 m</b>	in [m]
$\rho_{1/2a}$	Errechnete Luftdichte (Ebene 1 bzw. 2a)	in [kg/m <sup>3</sup> ]
$u_{1/2a}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit (Ebene 1 bzw. 2a)	in [m/s]

Um aus der Druckerhöhung  $\Delta p_{FRIK}$  den Schub  $F_{FRIK}$  zu erhalten, muss diese mit der Querschnittsfläche des Tunnelfahrtraums im Bereich der Impulsklappe  $A_{12}$  multipliziert werden (Gleichung (3-4))

$$F_{FRIK} = \Delta p_{FRIK} \cdot A_{1,2} \quad (3-4)$$

$F_{FRIK}$	Eingebrachter Schub durch Impulsklappe	in [N]
$\Delta p_{FRIK}$	Druckerhöhung durch Impulsklappe	in [Pa]
$A_{1,2}$	Fahrtraumquerschnitt in Ebene 1 und 2; <b>A<sub>1</sub>=A<sub>2</sub></b>	in [m <sup>2</sup> ]

### 3.3.2.2 Berechnung des max. einbringbaren Schubs (Impulssatz)

Im Gegensatz zu einem Strahlventilator gibt es bei einem Frischluftimpulssystem keinen bekannten Vergleichswert (wie zum Beispiel den Standschub).

Um die Messwerte trotzdem mit einer ‚Referenz‘ vergleichen und damit besser einschätzen zu können, kann für ein Frischluftimpulssystem jedoch der theoretisch maximal einbringbare Schub auf Basis des Impulssatzes errechnet werden (Gleichungen (3-5) und (3-6)):

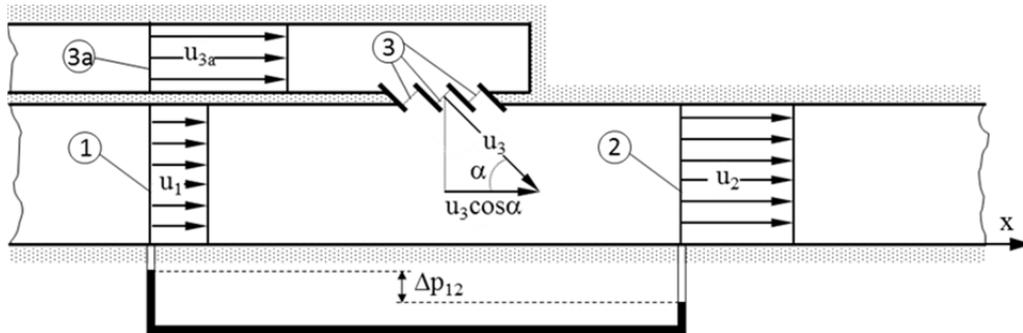


Abbildung 3-5: Beschleunigung ohne Rückströmung; [Sturm, Beyer, & Bacher, 2013]

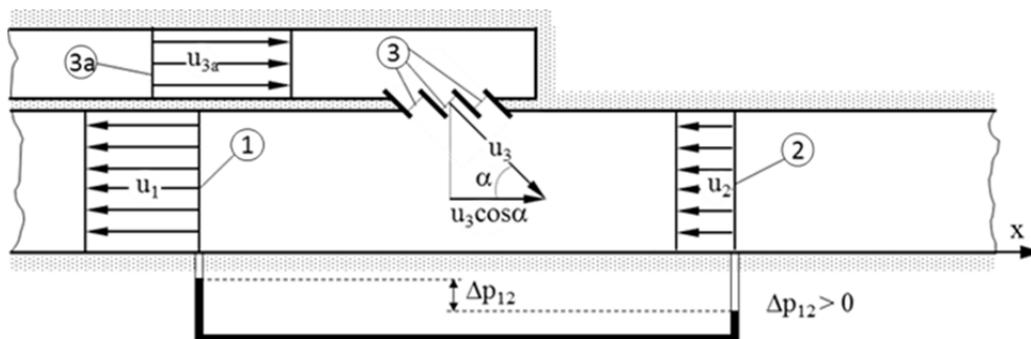


Abbildung 3-6: Abbremsen ohne Rückströmung; [Sturm, Beyer, & Bacher, 2013]

Bei Beschleunigung der Grundströmung (Abbildung 3-5):

$$F_{\text{FRIK\_theor.}} = \Delta p_{\text{FRIK\_theor.}} \cdot A_{1,2} = I_1 - I_2 \pm I_{3x} \quad (3-5)$$

Bei Abbremsen der Grundströmung (Abbildung 3-6):

$$F_{\text{FRIK\_theor.}} = \Delta p_{\text{FRIK\_theor.}} \cdot A_{1,2} = I_2 - I_1 \pm I_{3x} \quad (3-6)$$

$F_{\text{FRIK\_theor.}}$	Theor. einbringbarer Schub durch Impulsklappe	in [N]
$\Delta p_{\text{FRIK\_theor.}}$	Theor. erzielbare Druckerhöhung durch Impulsklappe	in [Pa]
$A_{1,2}$	Fahrraumquerschnitt in Ebene 1 und 2	in [m <sup>2</sup> ]
$I_{1,2}$	Impulsstrom über Ebene 1 bzw. 2	in [N]
$I_{3x}$	Impulsstrom über Impulsklappe in x-Richtung	in [N]

Das Vorzeichen für den Impulsstrom über die Impulsklappe in x-Richtung ( $I_{3x}$ ) hängt dabei jeweils von der Stellung der Impulsklappe (Winkel  $\alpha$ ) ab.

Im Beschleunigungsfall ist das Vorzeichen für Winkelstellungen zwischen 0 (vollständig geschlossen) und 90 Grad positiv und für Stellungen zwischen 90 und 140 Grad (maximale Winkelstellung) negativ, im Abbremsfall verhält es sich genau umgekehrt.

Die Impulsströme  $I_1$  und  $I_2$  bzw. der Anteil des Impulsstroms  $I_3$  in x-Richtung können dabei durch die Beziehungen (3-7) und (3-8) ersetzt werden:

$$I_{1,2} = \rho_{1,2} \cdot A_{1,2} \cdot u_{1,2}^2 \quad (3-7)$$

$$I_{3x} = \rho_3 \cdot A_3 \cdot u_3 \cdot \cos \alpha \quad (3-8)$$

$\rho_{1,2,3}$	Errechnete Luftdichte an den Messstellen 1 bis 3	in [m/s]
$A_{1,2}$	Fahrraumquerschnitt in den Ebenen 1 und 2	in [m <sup>2</sup> ]
$A_3$	Freie Durchströmfläche der Impulsklappe	in [m <sup>2</sup> ]
$u_{1,2}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Ebene 1 und 2	In [m/s]
$u_3$	Durchströmgeschwindigkeit der Impulsklappe	in [m/s]
$\alpha$	Blattwinkel der Lammellen der Impulsklappe	in [°]

Da die Durchströmgeschwindigkeit der Impulsklappe nicht gemessen werden kann, wird durch das Verhältnis von Volumenstrom des Zulüfters  $V_3$  zu freier Durchströmfläche  $A_3$  der Impulsklappe (Gleichung (3-9)) ersetzt.

$$u_3 = \frac{V_3}{A_3} \quad (3-9)$$

Setzt man nun die Beziehungen (3-7) bis (3-9) in Gleichung (3-5) ein, erhält man die Formel zur Berechnung des maximal einbringbaren Schubs (3-10)

$$F_{\text{FRIK,theor.}} = (\rho_1 \cdot A_1 \cdot u_1^2) - (\rho_1 \cdot A_1 \cdot u_1^2) \pm (\rho_3 \cdot A_3 \cdot u_3^2 \cdot \cos \alpha) \quad (3-10)$$

### 3.3.3 Abschätzung der Messunsicherheiten

Zur Bestimmung der Messunsicherheiten werden die Messgrößen, welche in die Berechnung des effektiv eingebrachten (Gleichung (3-3) bzw. (3-4)) bzw. maximal einbringbaren Schubes (Gleichung (3-10)) einfließen, entsprechend der Messunsicherheiten der verwendeten Messgeräte (siehe Tabelle 3-1) so kumuliert, dass der errechnete Schub jeweils einen Extremwert nach oben und nach unten annimmt:

$$\text{Beispiel: } u_{l\_max} = u_l + 0,1 \text{ m/s bzw. } u_{l\_min} = u_l - 0,1 \text{ m/s}$$

Dies stellt eine absolute Maximal-/Minimalbetrachtung dar, die zur Abschätzung der möglichen Fehler in den Ergebnissen dienen soll.

Für die Länge der Messpfade L wurde eine Abweichung von  $\pm 0,2$  m und für die Querschnittsflächen und Umfänge jeweils  $\pm 1,0\%$  angenommen. Für die freie Durchströmfläche der Impulsklappe wurde eine Unsicherheit von  $\pm 2,0\%$  und für den Blattwinkel von  $\pm 1,0^\circ$  angenommen.

Der Maximalwert aufgrund der Messunsicherheiten kann mit (3-11) bzw. (3-12) bestimmt werden:

$$F_{\text{FRIK\_max}} = \Delta p_{\text{FRIK\_max}} \cdot A_{1,2\_max} = \left[ \Delta p_{12\_max} \pm \lambda_{\text{max}} \cdot \left( \frac{L_{1-\text{FRIK\_max}}}{D_{h1\_min}} \cdot \frac{\rho_{1\_max}}{2} \cdot u_{1\_max}^2 + \frac{L_{\text{FRIK}-2\_max}}{D_{h2\_min}} \cdot \frac{\rho_{2\_max}}{2} \cdot u_{2a\_max}^2 \right) \right] \cdot A_{1,2\_max} \quad (3-11)$$

$$F_{\text{FRIK\_max}} = (\rho_{1\_max} \cdot A_{1\_max} \cdot u_{1\_max}^2) - (\rho_{1\_max} \cdot A_{1\_max} \cdot u_{1\_max}^2) \pm \left( \rho_{3\_max} \cdot \frac{V_{3\_max}^2}{A_{3\_min}} \cdot \cos \alpha_{\text{max}} \right) \quad (3-12)$$

Für die Minimalwerte auf Grund von Messunsicherheiten gelten dann im Gegenzug die Gleichung (3-13) und (3-14):

$$F_{\text{FRIK\_min}} = \Delta p_{\text{FRIK\_min}} \cdot A_{1,2\_min} = \left[ \Delta p_{12\_min} \pm \lambda_{\text{min}} \cdot \left( \frac{L_{1-\text{FRIK\_min}}}{D_{h1\_max}} \cdot \frac{\rho_{1\_min}}{2} \cdot u_{1\_min}^2 + \frac{L_{\text{FRIK}-2\_min}}{D_{h2\_max}} \cdot \frac{\rho_{2\_min}}{2} \cdot u_{2a\_min}^2 \right) \right] \cdot A_{1,2\_min} \quad (3-13)$$

$$F_{\text{FRIK\_min}} = (\rho_{1\_min} \cdot A_{1\_min} \cdot u_{1\_min}^2) - (\rho_{1\_min} \cdot A_{1\_min} \cdot u_{1\_min}^2) \pm \left( \rho_{3\_min} \cdot \frac{V_{3\_min}^2}{A_{3\_max}} \cdot \cos \alpha_{\text{min}} \right) \quad (3-14)$$

Das Gesamtspiel, unter Beachtung der Messunsicherheiten der Messgeräte gemäß Tabelle 3-1 und der angenommenen geometrischen Unsicherheiten, ist in den Ergebnistabellen (Tabelle 3-6 und Tabelle 3-10 für das Impulssystem Süd bzw. Tabelle 3-7 und Tabelle 3-11 für das Impulssystem Nord) angeführt.

### 3.3.4 Mess- und Berechnungsergebnisse

#### 3.3.4.1 Strecken-/Reibungsverluste

Die Rohrreibungszahl kann aus dem gemessenen Druckverlust  $\Delta p_{2a}$  über die Messstrecke  $L_{2a}$  gemäß Kapitel 3.3.2.1.2, Gleichung (3-2) errechnet werden. Voraussetzung dafür ist, dass sich in der gewählten Messstrecke keine zusätzlichen Strömungswiderstände wie Nischen, Pannenbuchten, Querschnittsänderungen bzw. aktive Strahlventilatoren oder ähnliches befinden.

Die Länge der Messstrecke  $L_{2a}$  betrug für das Frischluftimpulssystem Süd 503,9 m ( $\pm 0,2$  m). Die aufgezeichnete Längsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt betrug während der Reibungsmessung 4,44 m/s ( $\pm 0,1$  m/s), die gemessene Druckdifferenz über die Strecke lag bei 8,84 Pa ( $\pm(0,5\%+0,3)$ ).

Die Querschnittsfläche des Tunnels beträgt im Bereich der beiden Frischluftimpulssysteme jeweils 48,81 m<sup>2</sup> ( $\pm 1,0\%$ ), der Umfang liegt bei 27,46 m ( $\pm 1,0\%$ ). Daraus ergibt sich ein hydraulischer Durchmesser von 7,11 m ( $\pm 2\%$ ).

Die Luftdichte wurde für einen gemessenen barometrischen Luftdruck von 942,75 mbar und eine aufgezeichnete Lufttemperatur von 5,99°C gemäß Gleichung (3-1) ermittelt.

Für die gemessene Rohrreibungszahl im Bereich der Messstrecke Süd ergibt sich daraus ein Wert von  $\lambda = 0,0107$  mit einer Messunsicherheit von -10% / +11%.

Die Berechnungswerte und Messergebnisse für das Frischluftimpulssystem Süd sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst:

Tabelle 3-4: Ermittlung Streckenverluste – Frischluftimpulssystem Süd

$L_{2a}$	$D_{h2a}$	$\rho_{2a}$	$u_{2a}$	$\Delta p_{2a}$	$\lambda$
[m] ( $\pm 0,2$ )	[m] ( $\pm 2\%$ )	[kg/m <sup>3</sup> ] ( $\pm 0,16\%$ )	[m/s] ( $\pm 0,1$ )	[Pa] ( $\pm(0,5\%+0,3)$ )	(-10%/+11%)
503,9	7,11	1,1765	4,44	8,84	0,0107

Für das Frischluftimpulssystem Nord erfolgte die Berechnung der Rohrreibungszahl analog, wobei die Länge der Messstrecke  $L_{2a}$  in diesem Fall 505 m ( $\pm 0,2$  m) betrug, die gemessene Längsgeschwindigkeit im Querschnitt lag bei 4,13 m/s ( $\pm 0,1$  m/s). Die aufgezeichnete Druckdifferenz über die Strecke beträgt 7,03 Pa ( $\pm(0,5\%+0,3)$ ).

Der barometrische Luftdruck während der Messung lag bei 940,97 mbar, die Lufttemperatur bei 14,09°C.

Für die gemessene Rohrreibungszahl im Bereich der Messstrecke Nord ergibt sich daraus ein Wert von  $\lambda = 0,0102$  mit einer Messunsicherheit von -10% / +11%.

Die Berechnungswerte und Messergebnisse für das Frischluftimpulssystem Nord sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst:

Tabelle 3-5: Ermittlung Streckenverluste – Frischluftimpulssystem Nord

$L_{2a}$	$D_{h2a}$	$\rho_{2a}$	$u_{2a}$	$\Delta p_{2a}$	$\lambda$
[m] ( $\pm 0,2$ )	[m] ( $\pm 2\%$ )	[kg/m <sup>3</sup> ] ( $\pm 0,16\%$ )	[m/s] ( $\pm 0,1$ )	[Pa] ( $\pm(0,5\%+0,3)$ )	(-10%/+11%)
505,0	7,11	1,1412	4,13	7,03	0,0102

### 3.3.4.2 Effektiv in den Tunnel eingebrachter Schub

Um den effektiv vom Impulssystem eingebrachten Schub zu erhalten, musste in einem ersten Schritt die gemessenen Druckdifferenz  $\Delta p_{12}$  um die Verluste der Messstrecke  $L_{12}$  (Reibung) korrigiert werden. Die Korrektur erfolgte gemäß Kapitel 3.3.2.1.3, Gleichung (3-3).

Aus der resultierenden, reibungskorrigierten Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{FRIK}}$  kann dann auf Basis des Tunnelquerschnitts  $A_{1,2}$  ( $48,81 \text{ m}^2$ ) der tatsächlich eingebrachte Schub in den Fahrraum berechnet werden.

Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7 zeigen jeweils eine Zusammenfassung der gemessenen, effektiv eingebrachten Schübe für die Messungen 1 bis 4 für das Impulssystem Süd bzw. Nord. Ebenfalls in den Tabellen angeführt sind die gemäß Kapitel 0, Gleichung (3-11) und (3-13) abgeschätzten Messunsicherheiten angeführt. Sowohl beim Beschleunigen als auch beim Abbremsen wurde beim Einstellen der Strömung im Fahrraum darauf geachtet, dass es zu keiner Rückströmung (Volumenstromaufteilung) kommt.

Tabelle 3-6: gemessener Schub der Impulsklappe - Frischluftimpulssystem Süd

Messung	Grundströmung	Fall	$\Delta p_{12}$	$\Delta p_{\text{FRIK}}$	$F_{\text{FRIK}}$	Messunsicherheit	
	Richtung		[Pa]	[Pa]	[N]	[%]	
1	Nord / AUT	Beschleunigen*	<b>60,45</b>	73,09	<b>3158</b>	-3,12	+3,00
2	Nord / AUT	Abbremsen*	<b>101,72</b>	99,98	<b>4880</b>	-1,46	+1,49
3	Süd / SLO	Beschleunigen*	<b>40,24</b>	43,26	<b>2112</b>	-3,42	+3,44
4	Süd / SLO	Abbremsen*	<b>142,78</b>	138,87	<b>6778</b>	-1,23	+1,26

\*... ohne Rückströmung / Volumenstromaufteilung

Tabelle 3-7: gemessener Schub der Impulsklappe - Frischluftimpulssystem Nord

Messung	Grundströmung	Fall	$\Delta p_{12}$	$\Delta p_{\text{FRIK}}$	$F_{\text{FRIK}}$	Messunsicherheit	
	Richtung		[Pa]	[Pa]	[N]	[%]	
1	Süd / SLO	Beschleunigen*	<b>70,04</b>	73,09	<b>3567</b>	-2,70	+2,66
2	Süd / SLO	Abbremsen*	<b>101,24</b>	99,79	<b>4871</b>	-1,50	+1,52
3	Nord / AUT	Beschleunigen*	<b>31,03</b>	35,27	<b>1722</b>	-4,71	+4,25
4	Nord / AUT	Abbremsen*	<b>146,49</b>	143,19	<b>6989</b>	-1,25	+1,35

\*... ohne Rückströmung / Volumenstromaufteilung

Die gemessenen Schübe an den beiden Frischluftimpulssystemen liegen für die 4 untersuchten Fälle / Stellungen jeweils durchwegs in den gleichen Größenordnungen, insbesondere bei den beiden Abbremsfällen gibt es sogar nur sehr geringfügige Abweichungen zwischen den beiden Systemen. Prinzipiell ist der eingebrachte Schub jedoch von der Strömungssituation im Fahrraum vor und nach der Impulsklappe abhängig. Da die Messungen an unterschiedlichen Tagen stattfanden und die Strömungszustände nicht beide Male exakt gleich eingestellt werden konnten, sind die Abweichungen zwischen den beiden Frischluftimpulssystem in der gezeigten Größenordnung absolut normal und zu erwarten.

Da es bei Frischluftimpulssystem, im Gegensatz zu Strahlventilatoren, keinen am Prüfstand unter Normbedingungen gemessenen Standschub gibt, wurde als Bezugsgröße der maximal einbringbare Schub gemäß Impulssatz für die untersuchten Konstellationen gemäß Kapitel 3.3.2.2, Gleichung (3-10) errechnet. Die dafür erforderlichen Messwerte sind in Tabelle 3-8 für das Impulssystem Süd und in Tabelle 3-9 für das Impulssystem Nord zusammengefasst.

Tabelle 3-8: Messwerte zur Berechnung des max. einbringbaren Schubs - Impulssystem Süd

Messung	Messpunkt 3		Impulsklappe		Messpunkt 1		Messpunkt 2	
	$\rho_3$	$V_3$	$\alpha$	$A_3$	$\rho_1$	$u_1$	$\rho_2$	$u_2$
	$[kg/m^3]$	$[m^3/s]$	$[^\circ]$	$[m^2]$	$[kg/m^3]$	$[m/s]$	$[kg/m^3]$	$[m/s]$
1	1,2193	135,05	30	4,11	1,2053	2,08	1,1724	4,61
2	1,2184	135,93	145	5,38	1,2053	0,36	1,1754	3,21
3	1,2056	137,32	145	5,38	1,1767	-4,65	1,1547	-1,60
4	1,2195	135,80	30	4,11	1,1767	-5,16	1,1531	-2,04

Tabelle 3-9: Messwerte zur Berechnung des max. einbringbaren Schubs - Impulssystem Nord

Messung	Messpunkt 3		Impulsklappe		Messpunkt 1		Messpunkt 2	
	$\rho_3$	$V_3$	$\alpha$	$A_3$	$\rho_1$	$u_1$	$\rho_2$	$u_2$
	$[kg/m^3]$	$[m^3/s]$	$[^\circ]$	$[m^2]$	$[kg/m^3]$	$[m/s]$	$[kg/m^3]$	$[m/s]$
1	1,1864	139,32	30	4,11	1,1739	1,59	1,1428	4,30
2	1,1827	139,64	145	5,38	1,1703	0,26	1,1418	3,06
3	1,1845	139,44	145	5,38	1,1720	-5,42	1,1271	-2,36
4	1,1864	139,25	30	4,11	1,1739	-5,00	1,1256	-1,70

Die Blattwinkel  $\alpha$  der Impulsklappen wurden zwar über den Winkelgeber und die Leittechnik für und während jedem Test aufgezeichnet, da in den Klappen jedoch einiges an mechanischem Spiel vorhanden ist und diese über eine relativ große Hysterese zwischen Öffnen und Schließen aufweisen, wurde der effektive Blattwinkel manuell vor Beginn jeder Messung mit Hilfe eines Winkelmessers überprüft.

Die durchströmbare Fläche  $A_3$  Impulsklappe ist von der Winkelstellung und der Bauweise der Impulsklappe abhängig. Die für die Berechnungen verwendeten Werte wurden von der Herstellerfirma der Impulsklappe für die gemessenen Winkelstellungen ermittelt und zur Verfügung gestellt.

Die aus diesen Messwerten für die betrachteten Fälle auf Basis des idealisierenden Impulssatzes errechneten, maximal einbringbaren Schübe sind in Tabelle 3-10 (für das Impulssystem Süd) bzw. in Tabelle 3-11 (für das Impulssystem Nord) dargestellt. Zusätzlich dazu sind die gemäß Kapitel 0, Gleichung (3-12) und (3-14) errechneten, maximalen Messunsicherheiten angeführt.

Tabelle 3-10: berechneter max. einbringbarer Schub (Impulssatz) – Impulssystem Süd

Messung	Grundströmung	Fall	$F_{\text{FRIK}}$	Messunsicherheit	
	Richtung			$[N]$	$[\%]$
1	Nord / AUT	Beschleunigen*	<b>3723</b>	-11,90	+12,21
2	Nord / AUT	Abbremsen*	<b>4011</b>	-5,89	+6,13
3	Süd / SLO	Beschleunigen*	<b>2362</b>	-8,47	+10,50
4	Süd / SLO	Abbremsen*	<b>6033</b>	-7,41	+6,69

\* ... ohne Rückströmung / Volumenstromaufteilung

Tabelle 3-11: berechneter max. einbringbarer Schub (Impulssatz) – Impulssystem NORD

Messung	Grundströmung	Fall	$F_{\text{FRIK}}$ [N]	Messunsicherheit	
	Richtung			[%]	
1	Süd / SLO	Beschleunigen*	<b>3964</b>	-10,73	+11,18
2	Süd / SLO	Abbremsen*	<b>4029</b>	-5,82	+6,06
3	Nord / AUT	Beschleunigen*	<b>2129</b>	-8,68	+15,05
4	Nord / AUT	Abbremsen*	<b>6122</b>	-7,86	+6,32

\* ... ohne Rückströmung / Volumenstromaufteilung

Auf Grund der Vielzahl an benötigten Messwerten zur Berechnung des theoretisch einbringbaren Schubs und deren Einzelmessunsicherheiten sind die resultierenden Unsicherheiten für die errechneten Vergleichswerte mit ca. 6 bis 12%, im Vergleich zu den gemessenen, effektiv eingebrachten Schüben (1,3 bis 3,5%) relativ hoch. Dies gilt es bei deren Beurteilung und allen daraus abgeleiteten Werten zu berücksichtigen.

In Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 sind die gemessenen, effektiv in den Tunnel eingebrachten Schübe den theoretisch gemäß Impulssatz maximal einbringbaren Schüben für alle untersuchten Fälle grafisch gegenübergestellt.

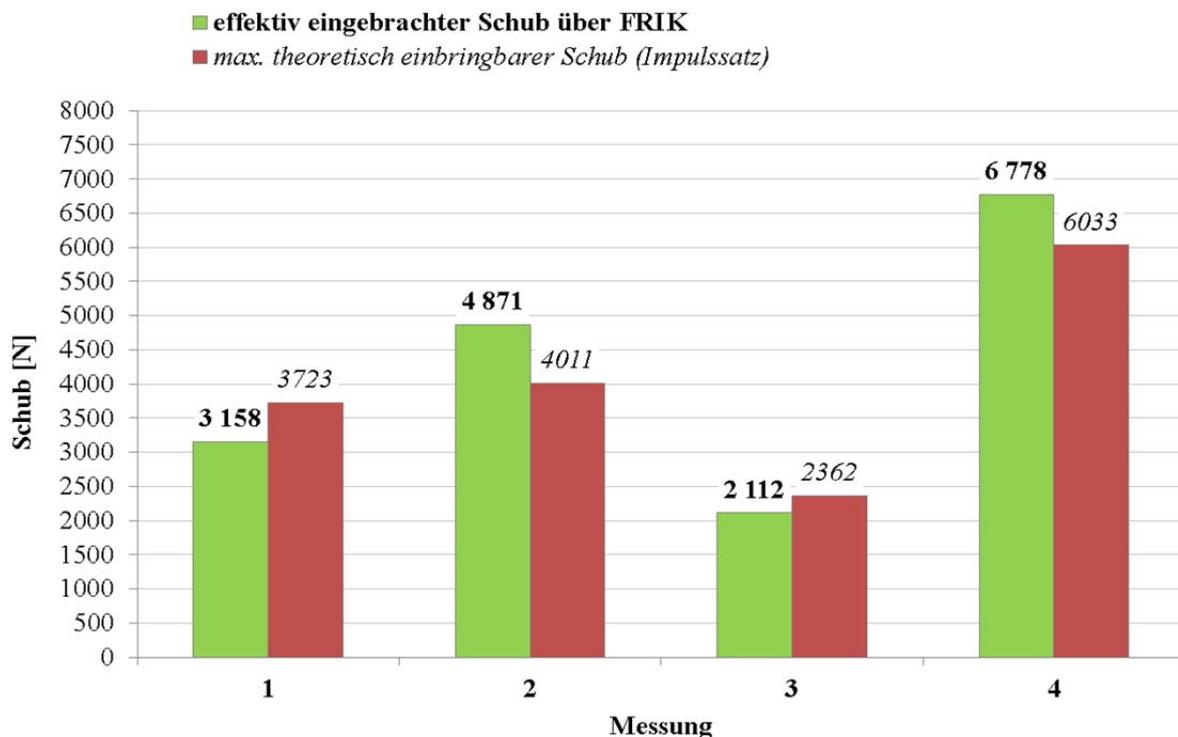


Abbildung 3-7: Gegenüberstellung eingebrachter Schub zu theoretisch einbringbarem Schub, bei örtlicher Luftdichte – Frischluftimpulssystem Süd

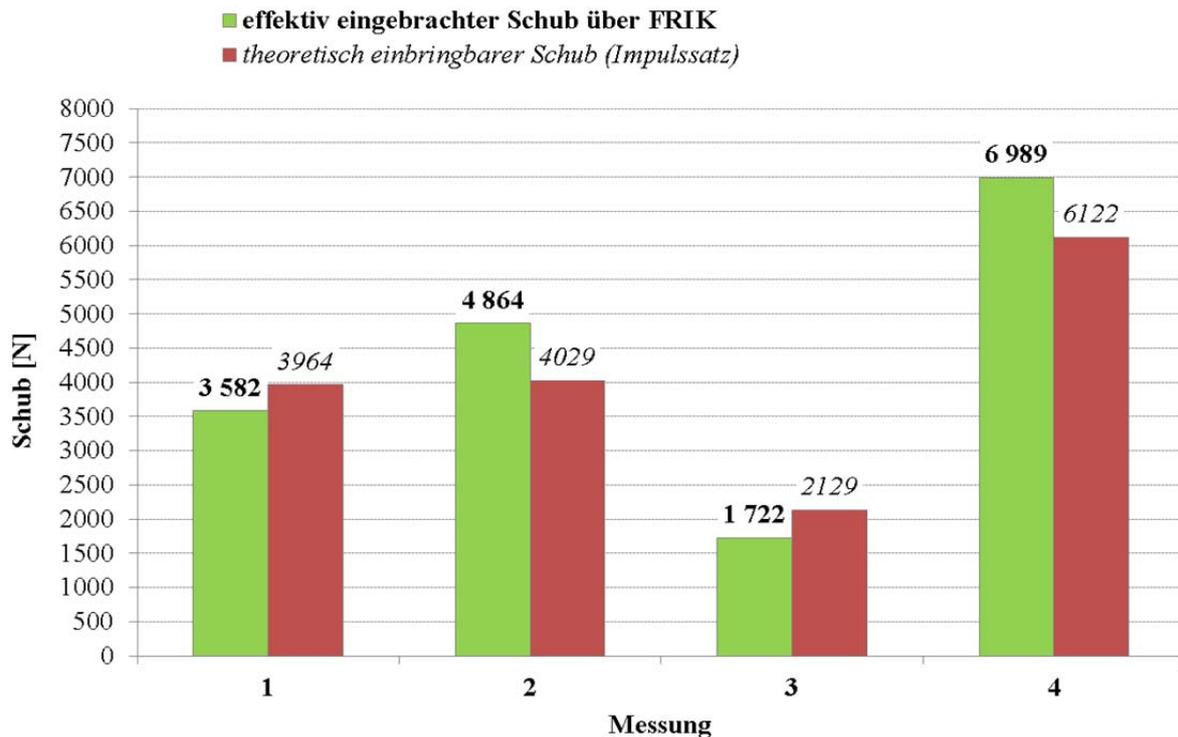


Abbildung 3-8: Gegenüberstellung effektiv eingebrachter zu theoretisch einbringbarem Schub, bei örtlicher Luftdichte – Frischluftimpulssystem Nord

Bei beiden Messreihen ist klar erkennbar, dass für alle untersuchten Fälle der Beschleunigung der Luftsäule im Fahrraum (ohne Rückströmung / Volumenstromaufteilung) der effektiv eingebrachte Schub kleiner ist als der theoretisch, gemäß Impulssatz maximal einbringbare, Schub. Grund hierfür ist dass, ähnlich wie bei Strahlventilatoren, die Luft in der Nähe der Tunneldecke mit (gegenüber der Grundströmung im Fahrraum) hoher Geschwindigkeit austritt. Die lokal hohen Geschwindigkeiten bringen erhöhte Reibungsverluste mit sich, was dazu führt, dass nicht der gesamte, theoretisch einbringbare Schub auf die Luftsäule aufgebracht werden kann.

Für jene Fälle, in denen die Strömung im Fahrraum abgebremst wird, zeigt sich jedoch relativ eindeutig, dass der tatsächlich eingebrachte Schub größer ist, als jener welcher gemäß Impulssatz eigentlich maximal möglich ist. Dieser Effekt ist bekannt und wird in [Pospisil, et al., 2010] kurz beschrieben: Der über die Frischluftimpulsklappe eingebrachte Luftstrahl, der ja gegen die Grundströmung im Fahrraum eingebracht wird, wird umgedreht und in Richtung Fahrbahn umgelenkt wird. Dieser am Boden ‚streifende‘ Strahl führt (ähnlich wie beim Beschleunigen an der Tunneldecke) zu erhöhten Reibungsverlusten auf Grund der noch immer deutlich erhöhten, lokalen Strahlgeschwindigkeit in diesem Bereich. Diese erhöhten Reibungskräfte bremsen die Luftsäule im Fahrraum noch zusätzlich zu dem entgegen der Strömung eingebrachten Impuls.

In beiden Fällen geht der gewählte, eindimensionale Ansatz zur Berechnung des maximal einbringbaren Schubs (Impulssatz) von einer idealen und vollständigen Umsetzung des Impulses in x-Richtung aus, und in beiden Fällen gibt es, wie sich durch die durchgeführten Messungen gezeigt hat, dreidimensionale Effekte, die mit dieser Betrachtungsweise nicht abgebildet werden können.

Um diese Effekte auch in eindimensionalen Ansätzen (wie zum Beispiel dem hier gewählten Impulssatz in x-Richtung) entsprechend berücksichtigen zu können, ist die Einführung eines sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{mx}$  und die entsprechende Erweiterung des

Impulssatzes um diesen Koeffizienten erforderlich.

In [Pospisil, et al., 2010] ist dieser Impulsumsetzungskoeffizient wie folgt definiert:

$$k_{mx} = \frac{F_{Dx} + F_{R\_TFRIK} - F_{R\_T}}{F_{Dx}} \quad (3-15)$$

$k_{mx}$	Impulsumsetzungskoeffizient	in [-]
$F_{Dx}$	Kraft in x-Richtung durch die FRIK im Tunnel	in [N]
$F_{R\_TFRIK}$	Wandreibungskraft bei Betrieb der FRIK	in [Pa]
$F_{R\_T}$	Wandreibungskraft ohne Betrieb der FRIK	in [m <sup>2</sup> ]

In Abbildung 3-9 ist die Kräftebilanz für den Fall der Beschleunigung der Grundströmung dargestellt, im oberen Bild für den Tunnel bei Betrieb der Frischluftimpulsklappe, im unteren Bild für den Tunnel ohne Betrieb des Impulssystems [Pospisil, et al., 2010].

Die Reibungskraft  $F_{R\_TFRIK}$  bei aktivem Impulssystem wird immer höher sein als die Reibungskraft  $F_{R\_T}$ , welche theoretisch bei einer reinen Längsströmung im selben Abschnitt auftreten würde. Dabei wird berücksichtigt, dass auf beiden Seiten der Impulsklappe unterschiedliche Geschwindigkeiten herrschen. In dem von der Reibungskraft  $F_{R\_TFRIK}$  der theoretisch reine Wandreibungsanteil  $F_{R\_T}$  abgezogen wird, erhält man jene Reibungsverluste, die nur durch das Impulssystem hervorgerufen werden [Pospisil, et al., 2010].

Den dimensionslosen Impulsumsetzungskoeffizienten erhält man, in dem man die Kraft  $F_{Dx}$  in x-Richtung durch das Impulssystem um den ‚bereinigten‘ Reibungsanteil  $F_{R\_TFRIK} - F_{R\_T}$  korrigiert und auf die ungeminderte eingebrachte Kraft  $F_{Dx}$  bezieht [Pospisil, et al., 2010].

Aus diesem Zusammenhang wird auch klar, warum im Falle des Abbremsens der Grundströmung im Tunnel der Impulsumsetzungskoeffizient Werte größer 1 annimmt.

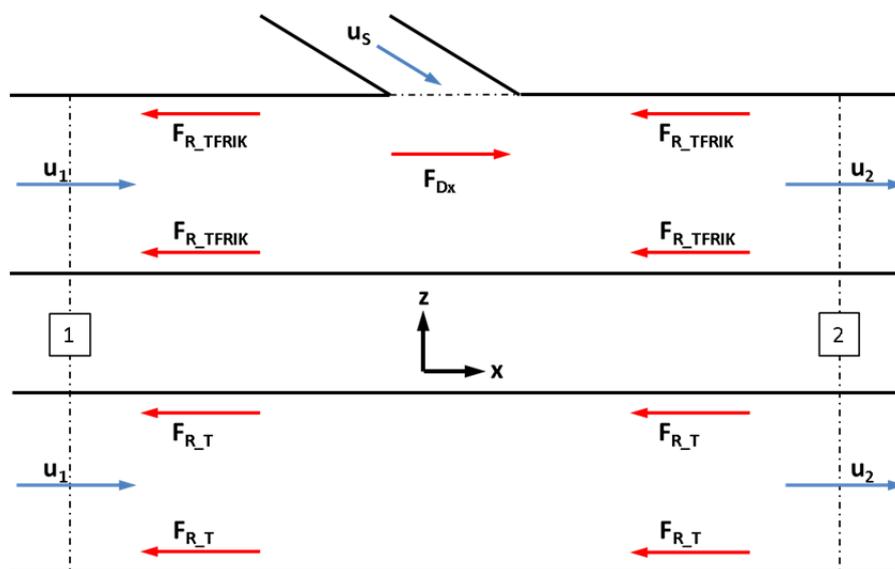


Abbildung 3-9: Kräftebilanz zur Definition des Impulsumsetzungskoeffizienten, modifiziert aus [Pospisil, et al., 2010]

Erweitert man nun die idealisierte Gleichung (3-10) aus Kapitel 3.3.2.2 um den oben definierten Impulsumsetzungskoeffizienten, erhält man an Stelle des maximal einbringbaren Schubs den effektiv eingebrachten Schub, wenn der Impulsumsetzungskoeffizient für den zu berechnenden Fall bekannt ist [Pospisil, et al., 2010]:

$$F_{\text{FRIK}} = (\rho_1 \cdot A_1 \cdot u_1^2) - (\rho_1 \cdot A_1 \cdot u_1^2) \pm k_{mx} \cdot (\rho_3 \cdot A_3 \cdot u_3^2 \cdot \cos \alpha) \quad (3-16)$$

Auf Basis von Gleichung (3-16) konnte in weiterer Folge aus den Messwerten (Tabelle 3-6, Tabelle 3-8 und Tabelle 3-10 für das Impulssystem Süd bzw. Tabelle 3-7, Tabelle 3-9 und Tabelle 3-11 für das Impulssystem Süd) der Impulsumsetzungskoeffizient für den jeweiligen Fall ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-12 zusammengefasst.

In [Pospisil, et al., 2010] wurden 3D-CFD Simulationen für ähnliche Fälle und Strömungszustände durchgeführt und aus den Ergebnissen der Impulsumsetzungskoeffizient abgeleitet. Diese sind ebenfalls in der Tabelle angeführt und den Werten aus den Messungen gegenübergestellt.

Tabelle 3-12: Impulsumsetzungskoeffizient, Gegenüberstellung Messwerte / Literaturwerte

Strömungszustand / Fall	Impulsklappe, Blattwinkel $\alpha$	Impulsumsetzungskoeffizient $k_{mx}$ [-]			
		Messungen (diese Studie)		Simulation (Literaturwerte)	
		System Süd	System Nord		
Beschleunigung (ohne Rückströmen)	15°	-		0,927	[Pospisil, et al., 2010]
	<b>30°</b>	<b>0,88</b>	<b>0,92</b>	0,934	
	35°	-		0,83–0,93	[Sutterlüty, 2012]
	45°	-		0,967	[Pospisil, et al., 2010]
	<b>145°</b>	<b>0,93</b>	<b>0,88</b>	-	
Abbremsen (ohne Rückströmen)	15°	-		1,063	[Pospisil, et al., 2010]
	<b>30°</b>	<b>1,16</b>	<b>1,18</b>	1,072	
	35°	-		1,060	[Sutterlüty, 2012]
	45°	-		1,083	[Pospisil, et al., 2010]
	<b>145°</b>	<b>1,25</b>	<b>1,24</b>	-	

Die auf Simulationen basierenden Daten aus [Pospisil, et al., 2010] liegen zwar für unterschiedliche Blattwinkel  $\alpha$  der Impulsklappe vor, allerdings nur bis 45°. Für die durchgeführten Messungen mit ‚durchgedrehter‘ Klappe (also Blattwinkel über 90°) gibt es dadurch keine Vergleichswerte aus der Literatur.

Die aus den Messungen abgeleiteten Impulsumsetzungskoeffizienten liegen, für den untersuchten Klappenwinkel von 30°, zwischen 0,88 und 0,92 für den Fall des Beschleunigens und zwischen 1,16 und 1,18 für den Fall des Abbremsens. Die Werte aus den Simulationen [Pospisil, et al., 2010] liegen beim selben Blattwinkel bei 0,934 für eine Beschleunigung und bei 1,072 für ein Abbremsen.

Für einen Klappenwinkel von 145° liegt der aus den Messungen ermittelte Impulsumsetzungskoeffizient zwischen 0,88 und 0,93 für eine Beschleunigung und zwischen 1,24 und 1,25 für ein Abbremsen der Strömung, Literaturwerte liegen für diesen Blattwinkel

jedoch keine vor.

Ersichtlich wird, dass die Werte für eine Beschleunigung für die beiden untersuchten Winkelstellungen an beiden Impulssystemen recht konstant sind, während beim Abbremsen die Werte für den Winkel von  $145^\circ$  (Komplementärwinkel zu  $35^\circ$ ) etwas höher ausfallen.

Im Vergleich zu den Literaturwerten (die auf CFD-Simulationen beruhen) zeigen die ermittelten Koeffizienten für Beschleunigung im Mittel eine sehr gute Übereinstimmung. Für das Abbremsen jedoch liegen die auf Messwerten basierenden Werte dieser Studie etwas höher als die Vergleichswerte aus der Literatur [Pospisil, et al., 2010].

In [Sutterlüty, 2012] wurden ebenfalls ähnliche Berechnungen, allerdings nur für einen einzigen Blattwinkel  $\alpha$  ( $35^\circ$ ) aber dafür für unterschiedliche Volumenstromverhältnisse, durchgeführt, die Ergebnisse sind auch in Tabelle 3-12 dargestellt. Der Blattwinkel von  $35^\circ$  Grad wurde zwar im Rahmen dieser Studie nicht vermessen, ein Vergleich mit den Messwerten für eine Klappenstellung von  $30^\circ$  Grad zeigt jedoch auch hier gute Übereinstimmungen mit den aus einer Simulation abgeleiteten Werten.

### 3.4 Schubeinbringung von Strahlventilatoren

#### 3.4.1 Messaufbau und Messprogramm

Die Messungen wurden ebenfalls in der Bestandsröhre des Karawankentunnels durchgeführt. Ursprünglich waren die Strahlventilatoren in einem ca. 1200 m langen Tunnelabschnitt ohne Zwischendecke (reines Hufeisenprofil) in Dreiergruppen angeordnet. Im Rahmen der umfangreichen Sanierung des Lüftungssystems in den Jahren 2014/2015 wurde in diesem Bereich jedoch ein neuer Abluftkanal errichtet, um die beiden bereits bestehenden Kanäle in den Außenbereichen miteinander zu verbinden. Die Anzahl an Strahlventilatoren wurde dabei auf 9 Stück reduziert, die Anordnung erfolgte einzeln neben dem neu errichteten Abluftkanal und nicht mehr in Tripeln.

Auf Grund der äußerst ungünstigen, neuen Montagesituation (siehe Abbildung 3-10) wurden Messungen zur Bestimmung des effektiv eingebrachten Schubs durchgeführt.

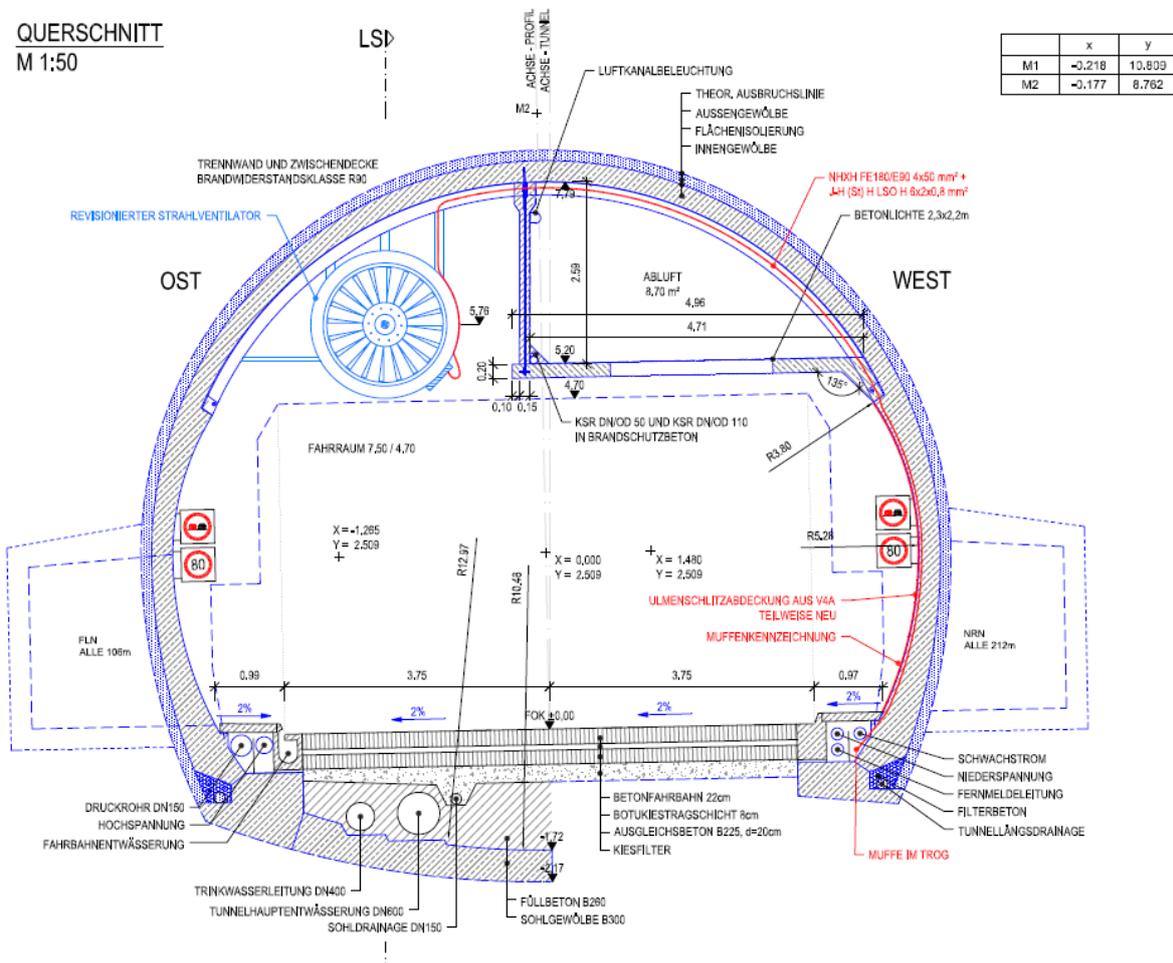


Abbildung 3-10: Einbausituation der Strahlventilatoren im Karawankentunnel; Auszug aus [ELIN GmbH. & CO.KG., 2014]

Da die Strahlventilatoren nun in jenem Bereich installiert wurden, in dem bei einer Vollquerlüftung normalerweise der Zuluftkanal liegt, kann sich der Luftstrahl nur nach unten zum Fahrraum hin uneingeschränkt ausweiten, zu allen anderen Seiten hin ist mit deutlich erhöhter Wandreibung (,Coanda-Effekt') zu rechnen, was zu einem insgesamt eher schlechten Einbaufaktor führt.

Abbildung 3-11 gibt einen Überblick über die Anordnung der Strahlventilatoren im Mittelbereich des Karawankentunnels. Auf Grund der Lage der Strahllüfter wurden diese für die Messungen in zwei Gruppen aufgeteilt.

Die Strahllüftergruppe Nord umfasst insgesamt 5 Strahlventilatoren (SL 2.1, SL 2.2, SL 3.1, SL 4.1 und SL 5.1), die Strahllüftergruppe Süd insgesamt 4 Strahlventilatoren (SL 11.1, SL 12.1, SL 13.1 und SL 14.1).

Die Abstände der Strahlventilatoren zueinander innerhalb der Lüftergruppen beträgt durchwegs nur zwischen 60 und 80 m, was in Anbetracht der Ventilatorbaugröße als sehr knapp angesehen werden muss.

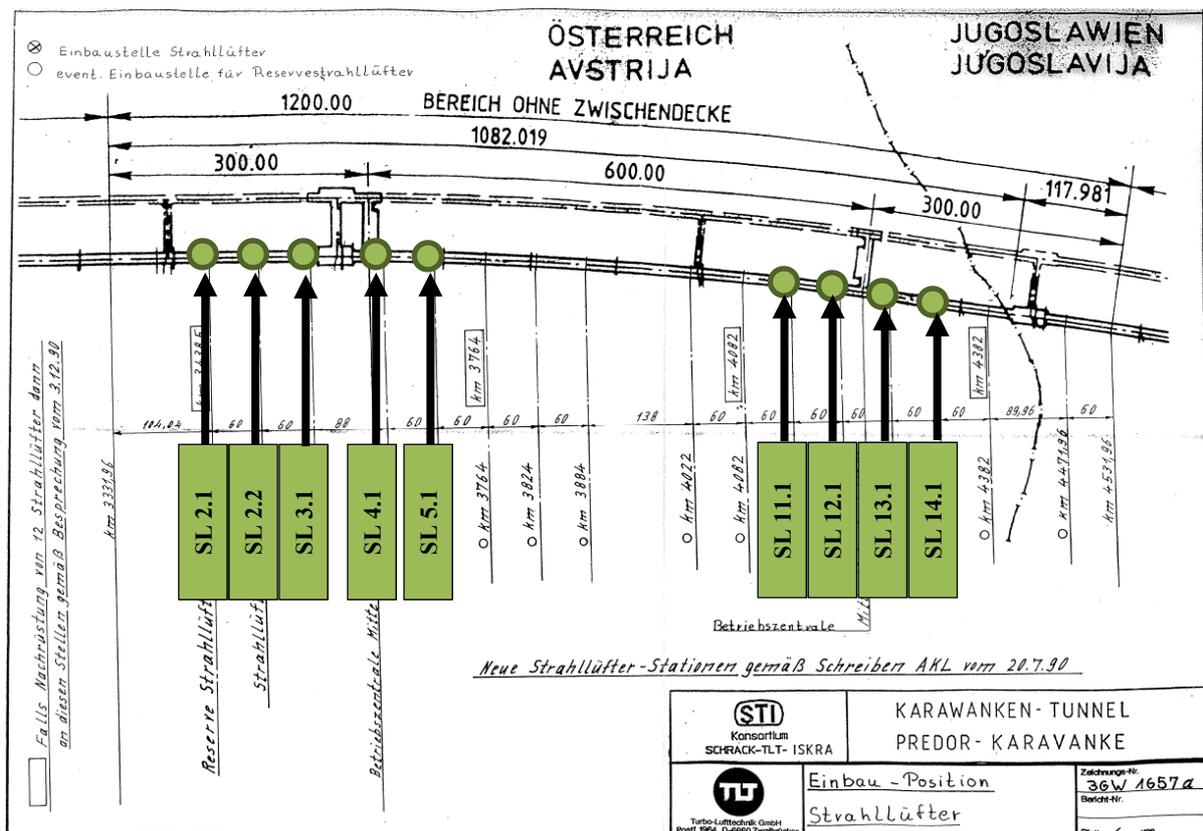


Abbildung 3-11: Anordnung der Strahlventilatoren im Karawankentunnel; [TLT Turbo Lufttechnik GmbH., 1990]

In der Strahllüftergruppe Nord befindet sich zwischen den Strahllüftern SL 03 und SL 04 eine große Ausweich- und Umkehrnische. Dieser Umstand wurde bei der Erstellung des Messkonzepts bzw. bei den durchgeführten Auswertungen entsprechend berücksichtigt.

### 3.4.1.1 Messaufbau

Ähnliche Messungen wurden vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz bereits im Bosrucktunnel und Tunnel Niklasdorf durchgeführt [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016]. Der in Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 dargestellte Messaufbau wurde in Anlehnung daran gewählt.

Bei der Messung der Druckdifferenzen über die Strahllüftergruppen muss sichergestellt sein, dass die Messpunkte stromauf- und stromabwärts jeweils im ungestörten, vollständig entwickelten Bereich der Strömung liegen. Gleichzeitig musste darauf geachtet werden, dass stromauf- (Strahllüftergruppe Süd) bzw. stromabwärts (Strahllüftergruppe Nord) noch ausreichend Abstand zum Wechsel von Ablufthalbquer- zu Vollquerlüftung und dem damit verbundenen Sprung in der Querschnittsfläche eingehalten wird.

Bei der Strahllüftergruppe Nord befindet sich der Messpunkt stromaufwärts (2) daher ca. 150 m und der Messpunkt stromabwärts (1) ca. 90 m von der Mitte des jeweils nächstgelegenen Strahlventilators entfernt, die Länge der Messstrecke betrug 504 m.

Zwischen Strahllüfter SL 3.1 und SL 4.1 befindet sich eine große Umkehr- und Pannenbucht in der Messstrecke. Die Strömungsverluste über diese Nische werden im Rahmen der durchgeführten Differenzdruckmessung zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten miterfasst.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wurde am Messpunkt (3) ca. 200 m südlich des letzten Strahlventilators der Gruppe (SL 5.1) stromaufwärts mit Hilfe eines streckenmittelnden Ultraschalllaufzeitdifferenz-Messgerätes der Fa. SICK erfasst.

Zusätzlich wurde an zwei Ventilatoren (SL 3.1 und SL 5.1) der Lüftergruppe Nord die Geschwindigkeit im Schalldämpfer mit Hilfe von eigens dafür angefertigten, dreiflügeligen Differenzdrucksonden  $u_{SL}$  gemessen.

Abbildung 3-12 zeigt eine schematische Darstellung des Messaufbaus im Bereich der Strahllüftergruppe Nord.

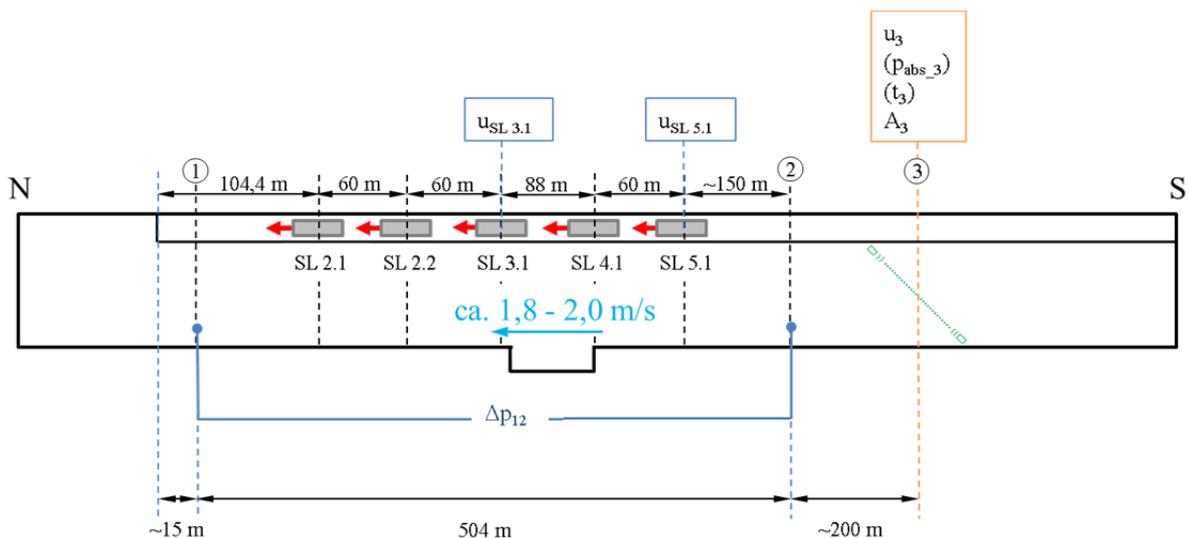


Abbildung 3-12: Schematische Darstellung Messaufbau – Strahllüftergruppe Nord

Bei der Strahllüftergruppe Süd befand sich der Messpunkt stromaufwärts (2) ca. 60 m und der Messpunkt stromabwärts (1) ca. 165 m von der Mitte des jeweils nächstgelegenen Strahlventilators entfernt.

Die Strömungsgeschwindigkeit wurde ca. 270 m nördlich des letzten Strahlventilators der Gruppe (SL 11.1) im Messpunkt (3), ebenfalls mit einem streckenmittelnden Ultraschalllaufzeitdifferenz-Messgerät der Fa. SICK, erfasst.

Abbildung 3-13 zeigt eine schematische Darstellung des Messaufbaus im Bereich der Strahllüftergruppe Süd.

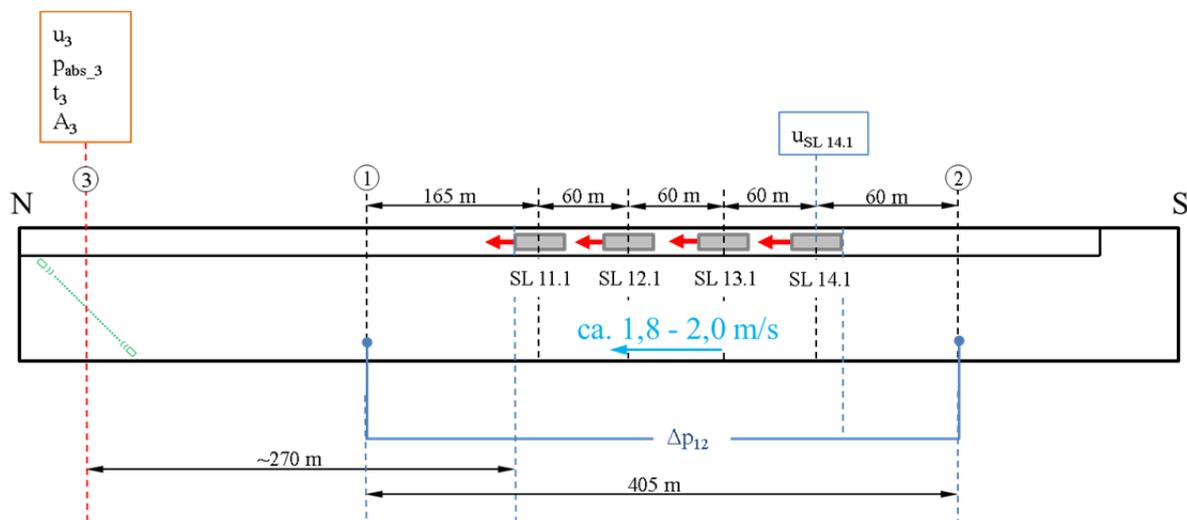


Abbildung 3-13: Schematische Darstellung Messaufbau – Strahllüftergruppe Süd

Alle statischen Differenzdrücke wurden mit Differenzdruckmessdosen der Fa. Halstrup & Walcher aufgezeichnet.

Zur Ermittlung der Luftdichte während den Messungen wurde der Absolutdruck mit einem temperaturkompensierten Präzisionsbarometer der Fa. Kroneis sowie die Lufttemperatur mit Hilfe eines kalibrierten Temperaturfühlers, ebenfalls von der Fa. Kroneis, an der Stelle der Geschwindigkeitsmessung (3) gemessen.

Die von den Herstellern angegebenen Unsicherheiten aller verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 3-13 angeführt.

### 3.4.1.2 Messgeräte

Die für die Untersuchungen verwendeten Messgeräte sind in nachstehender Tabelle 3-13 aufgelistet. Zudem finden sich in dieser Tabelle die von den Herstellern garantierten Messunsicherheiten und die Messbereiche der Geräte wieder.

Tabelle 3-13: Auflistung verwendeter Messgeräte – Schubmessung Strahlventilatoren

Messwert	Messgröße	Messgerät	Messbereich	Messunsicherheit
$u_3$	Geschwindigkeit	SICK (FLAWSIC 200)	-20 bis +20 m/s	$\pm 0,1$ m/s
$p_{abs\_3}$	Absolutdruck	Kroneis (Barogebir Type 315K)	850 bis 1050 hPa	$\pm 0,5$ hPa
$t_3$	Temperatur	Kroneis	-35 bis +45 °C	$\pm 0,15$ °C
$\Delta p_{12}$	Differenzdruck	Halstrup & Walcher P26	0 bis +500 Pa	$\pm(0,5\%* + 0,3$ Pa)
$u_{SV\ 3.1 / 5.1}$	Differenzdruck	Halstrup & Walcher P26	0 bis +2500Pa	$\pm(0,5\%* + 0,3$ Pa)
$u_{SV\ 14.1}$	Differenzdruck	Halstrup & Walcher P26	0 bis +2500Pa	$\pm(0,5\%* + 0,3$ Pa)

\*des Messwerts

### 3.4.1.3 Sonden zur Geschwindigkeitsmessung im Strahlventilator

#### 3.4.1.3.1 Konstruktionsweise der Geschwindigkeitssonden

Zur Messung der Geschwindigkeit im Strahlventilatoreintritt (saugseitiger Schalldämpfer) wurden 2 spezielle Sonden zur direkten Montage in den Schalldämpfern der Ventilatoren angefertigt. Diese Sonden bestehen im Grunde genommen aus 3 Flügeln, welche über zwei zentrale Verbindungsstücke im Zentrum miteinander verbunden sind.

Diese Art Sonde wurden am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz entwickelt und bei Messungen im Bosrucktunnel [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016] und im Tunnel Niklasdorf [Saurwein, 2014] bereits erfolgreich eingesetzt.

Jeder Flügel verfügt über 2 Reihen von Bohrungen (siehe Abbildung 3-14): eine an der Stirnseite des Flügels zur Aufnahme des Staudrucks, und eine am hinteren Ende der Flachseite zur Aufnahme des statischen Drucks. Hinter jeder Lochreihe sitzt ein gemeinsames Rohr, über welches auf diese Weise der jeweilige Druck über die gesamte Flügellänge gemittelt wird. Die beiden Rohre (für Staudruck und statischen Druck) sind an einem Ende verschlossen, am anderen münden sie in druckdichten Schraubverbindungen. Über diese können die Rohre zur Messung des Staudrucks sowie zur Messung des statischen Drucks der drei Flügel jeweils miteinander über die beiden zentralen Verbindungsstücke (kleines Bild in Abbildung 3-14) verbunden.

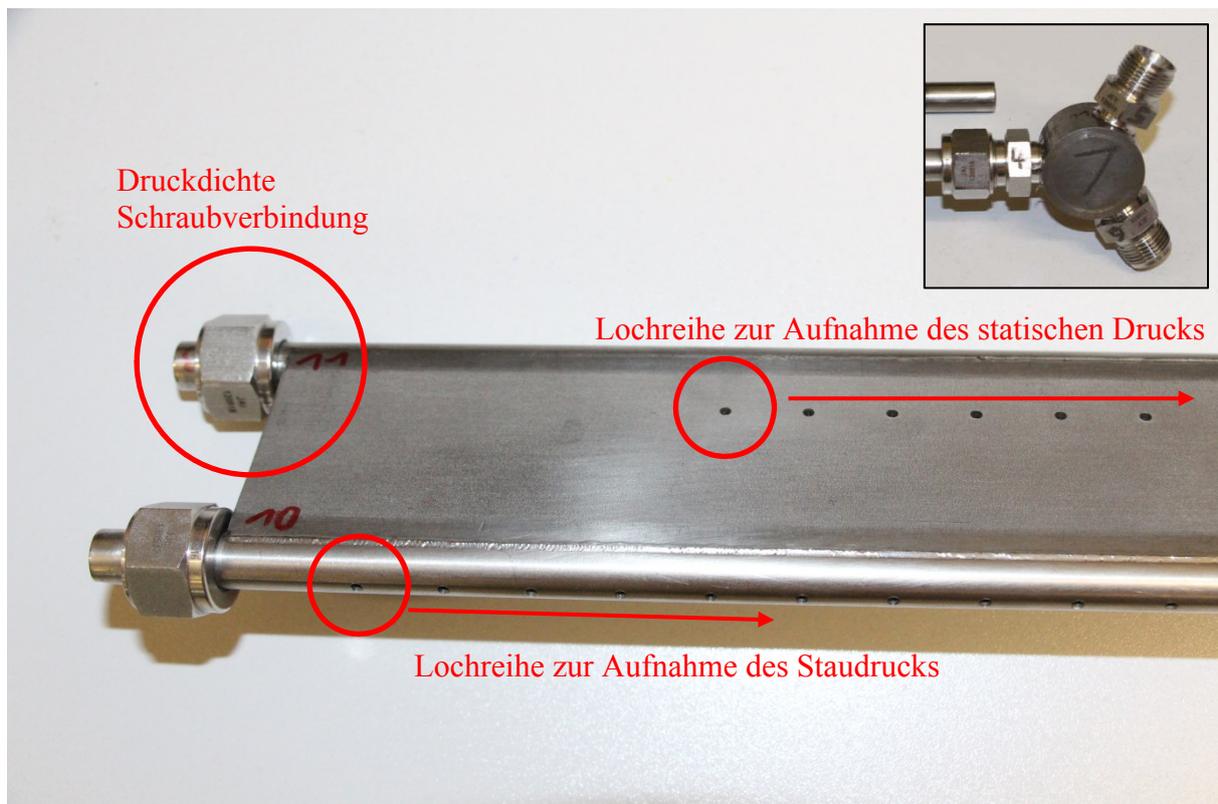


Abbildung 3-14: Detailansicht des Flügels einer Strahlventilatorsonde

Damit die Flügelsonden im Schalldämpfer eines Strahlventilators befestigt werden können, wurden an den Enden der 3 Flügel jeweils entsprechende gebogene Stangen angebracht, über die eine Befestigung direkt an den Lochblechen an der Innenseite des saugseitigen

Schalldämpfers möglich ist (siehe Abbildung 3-15). Die gebogenen Stangen sorgen dafür, dass der Abstand aller drei Flügel zur Außenkante des Schalldämpfers gleich groß ist. Zusätzlich wird dadurch bei Bruch der Befestigungen verhindert, dass die Messvorrichtung vom Ventilator angesaugt und dieser beschädigt wird.

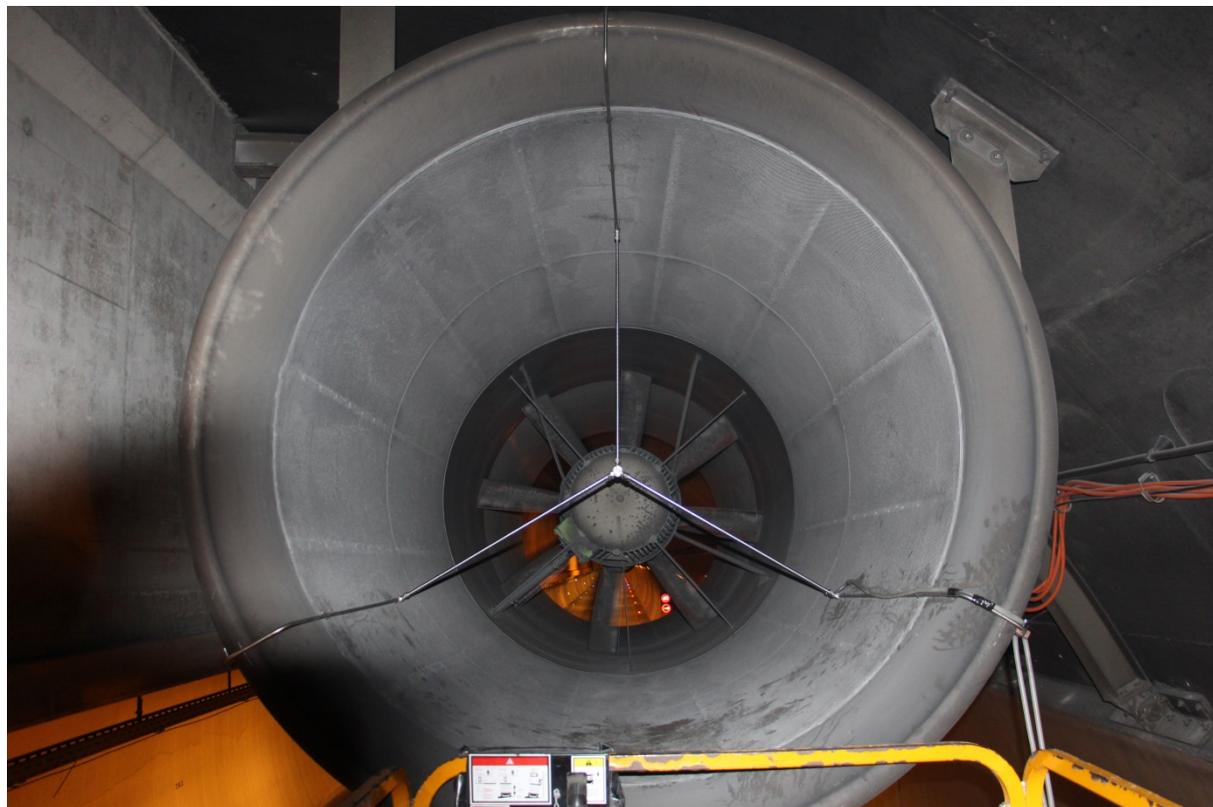


Abbildung 3-15: Einbausituation Flügelsonde im Strahlventilator SL 5.1

Um sicherzustellen, dass die Messflügel und die Verbindungsstücke sowie die Schraubverbindungen absolut dicht sind, wurde für beide Sonden abschließend jeweils eine Druckprüfung im zusammengebauten Zustand durchgeführt.

#### 3.4.1.3.2 Kalibrierung der Geschwindigkeitssonden

Die beiden Flügelsonden stellen eine Sonderkonstruktion dar, und weichen in Form und Geometrie daher deutlich von einer klassischen Staudrucksonde zur normierten Geschwindigkeitsmessung ab. Es kann nicht sichergestellt werden, dass diese Abweichungen keinen Einfluss auf die gemessene Druckdifferenz haben. Die beiden Sonden wurden daher in einem geeigneten Windkanal für den später relevanten Geschwindigkeitsbereich kalibriert.

##### 3.4.1.3.2.1 Kalibrierungsaufbau

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte, analog zu den Geschwindigkeitssonden für die Netzmessungen (siehe Kapitel 2.3.1.3) im Niedergeschwindigkeitswindkanal des Instituts für Strömungslehre und Wärmeübertragung (ISW) der TU Graz. Der Kanal verfügt über einen rechteckigen Querschnitt, die verwendete Standarddüse hat eine Fläche von  $2,0 \times 1,46 \text{ m}$ .

Die Flügelsonden wurden einzeln im Windkanal kalibriert, wobei zur Befestigung am Prüfstand eigene Adapter hergestellt wurden.

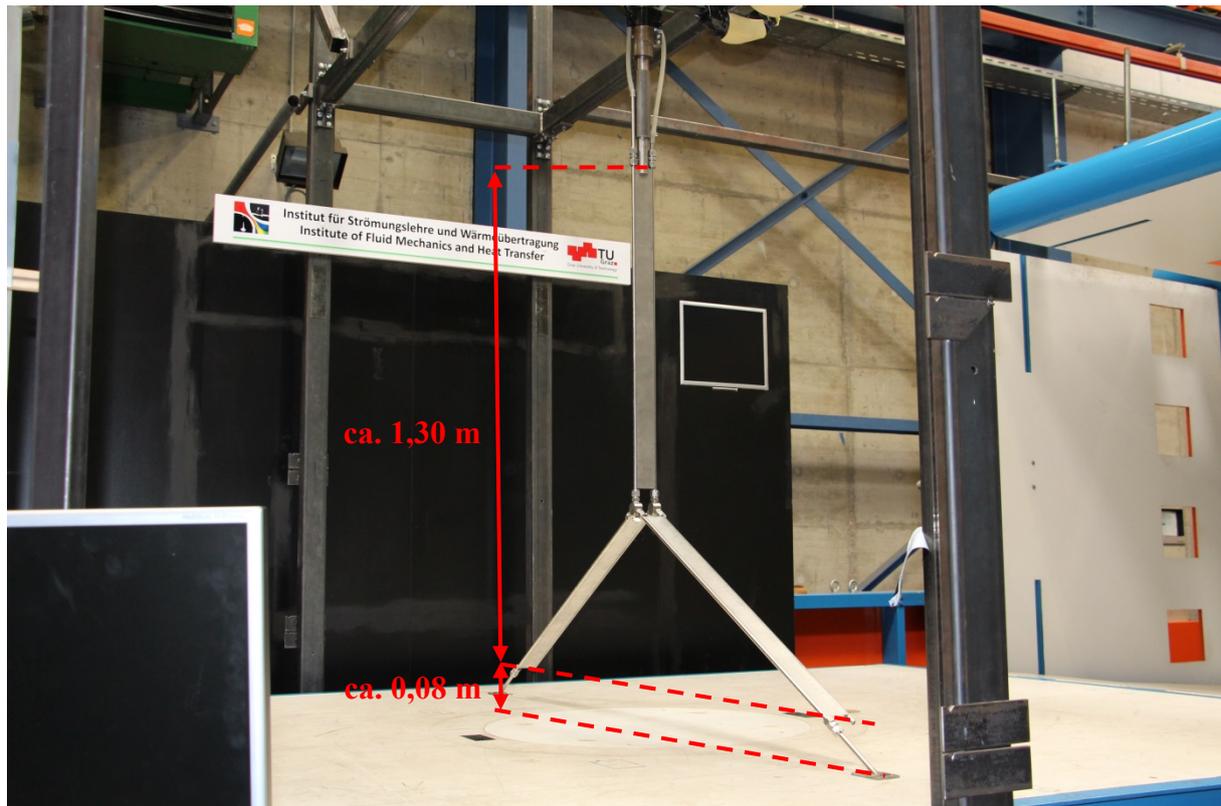


Abbildung 3-16: Kalibrieraufbau einer Strahlventilatorsonde im Windkanal

Die gedachte Verbindungslinie zwischen den unteren Enden der beiden schrägen Flügel lag dabei ca. 8 cm über dem Prüftisch, das obere Ende des vertikalen Flügels befand sich insgesamt 1,38 m darüber (siehe Abbildung 3-16).

#### 3.4.1.3.2.2 Kalibriervorgang

Kalibriert wurde für jede Sonde die gesamte Messkette, wie sie auch in den späteren Schubmessungen verwendet worden ist, bestehend aus:

- Flügelsonde
- Sondenbestigung
- Schlauchverbindungen Sondenausgänge/Differenzdruckmessdose
- Differenzdruckmessumformer (Halstrup Walcher P26)
- Datenerfassung und Signalverarbeitung (DASYLab)

Die Kalibrierung erfolgte für Geschwindigkeiten von +22,0 bis +38,0 m/s mit einer Schrittweite von 2,0 m/s im Kernmessbereich (28,0 m/s bis 38,0 m/s) und einer Schrittweite von 6,0 m/s außerhalb dieses Kernbereichs. Jede Geschwindigkeitsstufe wurde, nach Erreichen eines stationären Zustands, für 3 Minuten gehalten um eine Mittelwertbildung zu ermöglichen.

Dabei wurde der im Windkanal gemessene dynamische Druck, Luftdruck und -temperatur sowie die daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit über die Dauer des Tests aufgezeichnet und gemittelt. Gleichzeitig wurden die vom Druckmessumformer der aufgebauten Flügelsonde ausgegebenen Spannungssignale aufgezeichnet.

### 3.4.1.3.2.3 Auswertung der Kalibriermessungen

Nach Durchführung der Kalibriermessungen wurde für jede Flügelsonde der an der Sonde mit Hilfe des Differenzdruckmessumformers erfasste Differenzdruck dem im Windkanal bei der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe gemessenen dynamischen Druck zugeordnet.

Die beiden Messsonden sind prinzipiell baugleich. Da Fertigungstoleranzen nicht auszuschließen sind, und die beiden Sonden gleichzeitig und somit mit unterschiedlichen Differenzdruckmessumformern betrieben werden, werden beide Sonden inkl. dem jeweils zugeordnetem Messumformer separat kalibriert.

Die Ergebnisse für die beiden Messsonden sind in Tabelle 3-14 bzw. Tabelle 3-15 zusammengefasst:

Tabelle 3-14: Kalibrierergebnis, Sonde Strahlflüfter 3.1

Messdaten Windkanal					Messdaten Sonde	Kalibrierfaktor
$v_{SOLL}$	$v_{IST}$	$\Delta p_{Windkanal}$	$T_{Luft}$	$p_{Luft}$	$\Delta p_{Sonde}$	$\Delta p_{Sonde} / \Delta p_{Windkanal}$
[m/s]	[m/s]	[Pa]	[°C]	[mbar]	[Pa]	[-]
22	22,02	274,7	26,71	978	318	<b>1,1576</b>
28	28,02	443,2	27,68	978	515	<b>1,1620</b>
30	29,99	506,5	28,43	978	590	<b>1,1649</b>
32	32,04	576,6	29,10	978	670	<b>1,1620</b>
34	33,94	645,3	29,89	978	755	<b>1,1700</b>
36	36,02	725,2	30,62	978	845	<b>1,1652</b>
38	38,56	828,4	31,62	978	960	<b>1,1589</b>

Tabelle 3-15: Kalibrierergebnis, Sonde Strahlflüfter 5.1

Messdaten Windkanal					Messdaten Sonde	Kalibrierfaktor
$v_{SOLL}$	$v_{IST}$	$\Delta p_{Windkanal}$	$T_{Luft}$	$p_{Luft}$	$\Delta p_{Sonde}$	$\Delta p_{Sonde} / \Delta p_{Windkanal}$
[m/s]	[m/s]	[Pa]	[°C]	[mbar]	[Pa]	[-]
22	22,11	278,7	21,32	967	329	<b>1,1805</b>
28	28,03	447,0	21,84	967	528	<b>1,1812</b>
30	30,08	513,9	22,36	967	607	<b>1,1812</b>
32	32,04	582,2	22,94	967	687	<b>1,1799</b>
34	34,06	656,7	23,42	967	775	<b>1,1801</b>
36	36,04	733,8	23,95	967	866	<b>1,1802</b>
38	38,56	828,4	24,36	967	978	<b>1,1806</b>

Das Verhältnis des Sondenmesswerts zum Messwert aus dem Windkanal liefert den Kalibrierfaktor für die jeweilige Geschwindigkeitsstufe. Da der Kalibrierfaktor über den betrachteten Geschwindigkeitsfaktor leicht schwankt, wurde für jede Sonde ein Mittelwert über alle Geschwindigkeitsstufen gebildet und für alle weiteren Berechnungen herangezogen.

Der mittlere Kalibrierfaktor für die Sonde in Strahlflüfter 3.1 beträgt 1,1629 (+0,6% / -0,5%) jener für die Sonde in Strahlflüfter 5.1 beträgt 1,1805 (+0,06% / +0,05%).

### 3.4.1.4 Messprogramm

Für jede Strahllüftergruppe wurde die Druckdifferenz über die Messstrecke jeweils zuerst ohne aktive Strahlventilatoren innerhalb der Strecke und anschließend bei aktiven Strahlventilatoren vermessen, wobei die Zuschaltung der Strahlventilatoren gestaffelt und mit entsprechend zeitlichem Abstand zueinander erfolgte.

Die Messung der Druckdifferenz ohne aktive Strahlventilatoren dient zur Bestimmung der Strömungsverluste über die jeweilige Messstrecke selbst. Bei der Strahllüftergruppe Süd handelt es sich dabei um reine Wandreibungsverluste, bei der Strahllüftergruppe Nord um die Wandreibungsverluste und die Verluste durch die Querschnittsänderungen im Bereich der großen Umkehr- und Pannenbucht. Dazu wurde eine möglichst hohe Grundströmung 4,0 m/s mit der jeweils verbleibenden Strahllüftergruppe sowie den beiden Frischluftimpulssystemen eingestellt, um die Messunsicherheiten der Differenzdruckmessung möglichst klein zu halten.

Bei den übrigen Messungen (mit aktiven Strahlventilatoren in der Messstrecke) wurde versucht, die Grundströmung im Tunnel über die Dauer der gesamten Messung möglichst konstant im Bereich um 2,0 m/s zu halten, um einerseits möglichst reale Randbedingungen bzgl. des späteren Betriebsfalls zu schaffen und andererseits die Messwerte der einzelnen Schaltstufen und der beiden Strahllüftergruppen untereinander vergleichbar zu halten. Um die Grundströmung im Tunnel konstant auf dem gewünschten Niveau zu halten, wurden Strahlventilatoren der jeweils nicht vermessenen Gruppe zu- bzw. weggeschaltet. Für die Messungen wurden alle Strahlventilatoren ausschließlich im Reversierbetrieb (Blasrichtung Norden) betrieben, da dies den schlechtesten Fall darstellt.

Gemessen wurden jeweils Absolutdruck, Lufttemperatur und –geschwindigkeit im Fahrraum, sowie die statische Druckdifferenz über die Messstrecke.

Alle Messwerte wurden kontinuierlich aufgezeichnet, wobei die Aufzeichnungsfrequenz der Geschwindigkeitsmessungen 3 Hz und die der übrigen Messwerte jeweils 1 Hz beträgt. Nach Erzielung eines stationären Strömungszustandes wurden die Messgrößen über eine Dauer von etwa 10 Minuten aufgezeichnet, anschließend über diese Dauer gemittelt und für die Bestimmung des eingebrachten Schubes der Strahlventilatoren ausgewertet. Die Messung zur Bestimmung der Wandreibung wurde nach Erhalt eines stationären Strömungszustandes etwa 10 Minuten lang aufgezeichnet.

Eine Zusammenfassung aller durchgeführten Messungen kann Tabelle 3-16 (Strahllüftergruppe Nord) bzw. Tabelle 3-17 (Strahllüftergruppe Süd) entnommen werden.

Tabelle 3-16: Auflistung der durchgeführten Messungen – Strahllüftergruppe Nord

Messung	Schaltzustand Strahlventilatoren					Grundströmung [m/s]	Lüftungsrichtung
	SL 2.1	SL 2.2	SL 3.1	SL 4.1	SL 5.1		
R	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS	3,15	Nord / AUT
1	AUS	AUS	AUS	AUS	AKTIV	2,39	Nord / AUT
2	AUS	AUS	AUS	AKTIV	AKTIV	2,59	Nord / AUT
3	AUS	AUS	AKTIV	AKTIV	AKTIV	2,54	Nord / AUT
4	AUS	AKTIV	AKTIV	AKTIV	AKTIV	2,57	Nord / AUT
5	AKTIV	AKTIV	AKTIV	AKTIV	AKTIV	2,86	Nord / AUT

Tabelle 3-17: Auflistung der durchgeführten Messungen – Strahllüftergruppe Süd

Messung	Schaltzustand Strahlventilatoren				Grundströmung [m/s]	Lüftungsrichtung
	SL 11.1	SL 12.1	SL 13.1	SL 14.1		
R	AUS	AUS	AUS	AUS*	4,36	Nord / AUT
1	AUS	AUS	AKTIV	AUS*	2,38	Nord / AUT
2	AUS	AKTIV	AKTIV	AUS*	2,36	Nord / AUT
3	AKTIV	AKTIV	AKTIV	AUS*	2,24	Nord / AUT

\*... Strahllüfter SL 14.1 der Strahllüftergruppe Süd war zum Zeitpunkt der Messungen falsch verkabelt, wodurch die Drehrichtung verkehrt war. Um den Strahllüfter in Richtung Nord betreiben zu können, hätte er in Richtung Süd aktiviert werden müssen. Die Leittechnik erlaubt aus Sicherheitsgründen jedoch nicht, dass Strahlventilatoren gleichzeitig in unterschiedlicher Richtung betrieben werden. Deshalb konnten lediglich die Strahllüfter SL 11.1 bis SL 13.1 vermessen werden.

### 3.4.2 Berechnungs- und Auswertungsverfahren

#### 3.4.2.1 Berechnung des effektiv eingebrachten Schubs

##### 3.4.2.1.1 Berechnung der Luftdichte

Die während den Messungen vorherrschende Luftdichte  $\rho$  wurde aus den in der Ebenen 3 (siehe Abbildung 3-12 bzw. Abbildung 3-13) jeweils gemessenen Absolutdrucks  $p_{\text{abs},3}$  sowie der Lufttemperatur  $t_3$  auf Basis der idealen Gasgleichung (siehe hierzu Kapitel 3.3.2.1.1, Gleichung (3-1)) berechnet

Die Berechnung der Luftdichte nach Gleichung (3-1) basiert wiederum auf der Annahme, dass die Tunnelluft als ideales Gas betrachtet werden kann.

Auch hier wurde mit den Stoffwerten für trockene Luft ( $R_L = 287,058 \text{ J/kgK}$ , relative Feuchte  $R.H. = 0\%$ ) gerechnet, da der mögliche Fehler in einer Größenordnung liegt, die für alle weiteren Berechnungen und Auswertungen keinen relevanten Einfluss hat.

##### 3.4.2.1.2 Berechnung der Strömungsverluste in der Messstrecke

Der Gesamtwiderstandsbeiwert (Reibung und Querschnittsänderungen einer Nische/Pannenbucht) der Messstrecke (ohne aktive Strahlventilatoren) lässt sich aus Gleichung (3-17) berechnen.

$$\left( \lambda \cdot \frac{L_{12}}{D_{h2}} + \zeta_N \right) = \zeta_{\text{ges}} = \frac{2 \cdot \Delta p_{12}}{\rho \cdot u_3^2} \quad (3-17)$$

$\lambda$	Rohrreibungszahl	in [-]
$L_{12}$	Messstrecke zur Bestimmung der Streckenverluste	in [m]
$D_{h2}$	Hydraulischer Durchmesser der Ebene 2: <b>7,09 m</b>	in [m]
$\zeta_N$	Widerstandsbeiwert der Nische/Pannenbucht	in [-]
$\zeta_{\text{ges}}$	Gesamtwiderstandsbeiwert der Messstrecke	in [-]
$\Delta p_{12}$	Gemessene Druckdifferenz über Messstrecke $L_{12}$	in [Pa]
$\rho$	Luftdichte während der Messung	in [ $\text{kg/m}^3$ ]
$u_3$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Ebene 3	in [m/s]

Da sich in der Messstrecke der Strahllüftergruppe Süd keine Nische/Pannenbucht befindet, kann für die betreffenden Messungen der Widerstandsbeiwert für die Nische/Pannenbucht  $\zeta_N$  gleich Null gesetzt werden. Damit reduziert sich der Gesamtwiderstandsbeiwert  $\zeta_{ges}$  in der Messstrecke Süd auf den reinen Rohrreibungswiderstand  $\lambda$ .

Die Länge der Messstrecke  $L_{12}$  betrug für die Strahllüftergruppe Nord ca. 504 m und für die Strahllüftergruppe Süd ca. 405 m (siehe Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13).

### 3.4.2.1.3 Berechnung des eingebrachten Schubs

Die Druckerhöhung  $\Delta p_{12}$  im Bereich der Ebene 1 und 2 enthält auch die Streckenverluste (Reibung, Querschnittsänderungen durch Nische/Pannenbucht) innerhalb dieser Messstrecke. Um auf den tatsächlich eingebrachten Schub zu gelangen, muss dieser entsprechend korrigiert werden. In Abbildung 3-17 ist der hier erläuterte Zusammenhang zwischen gemessenen Druckerhöhung und der Druckerhöhung aufgrund des eingebrachten Schubes schematisch dargestellt.

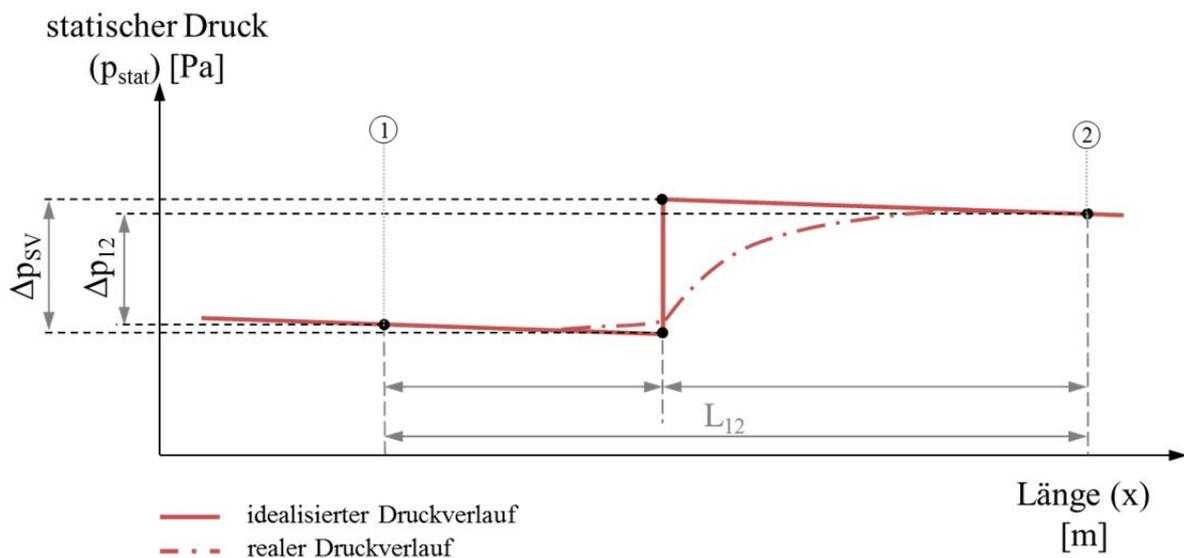


Abbildung 3-17: statischer Druckverlauf eines Teilchens das am Strahlventilator vorbeiströmt (real / idealisiert), nach [Beyer, Sturm, Saurwein, & Bacher, 2016]

Die Druckerhöhung im Tunnel aufgrund des eingebrachten Schubes der Strahlventilatoren  $\Delta p_{SV}$  lässt sich daher mit nachfolgendem Zusammenhang beschreiben.

$$\Delta p_{SV} = \Delta p_{12} + \zeta_{ges} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u_3^2 \quad (3-18)$$

$\Delta p_{SV}$	Druckerhöhung im Tunnel auf Grund des eingebrachten Schubes der Strahlventilatoren	in [Pa]
$\Delta p_{12}$	Gemessene Druckerhöhung zwischen Ebene 1 und 2	in [Pa]
$\zeta_{ges}$	Gesamtwiderstandsbeiwert der Messstrecke	in [-]
$\rho$	Luftdichte während der Messung	in [kg/m <sup>3</sup> ]
$u_3$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Ebene 3	in [m/s]

Aufgrund der Tatsache, dass je nach Messung unterschiedlich viele Strahlventilatoren gleichzeitig aktiv waren, ist die gemessene und korrigierte Druckerhöhung gemäß (3-18) durch die Anzahl  $n$  an aktiven Strahlventilatoren in der Messstrecke zu dividieren. Es wird dabei davon ausgegangen, dass alle aktiven Strahlventilatoren der Strahllüftergruppe den exakt gleichen Beitrag leisten. In Realität ist jedoch sicherlich von einer leichten Ungleichheit auszugehen.

Der eingebrachte Schub je aktivem Strahlventilator lässt sich somit anhand Gleichung (3-19) berechnen.

$$F_{SV} = \frac{\Delta p_{SV}}{n} \cdot A_1 \quad (3-19)$$

$\Delta p_{SV}$	Druckerhöhung auf Grund des eingebrachten Schubes der Strahlventilatoren	in [Pa]
$n$	Anzahl aktiver Strahlventilatoren in der Messstrecke	in [Pa]
$A_1$	Tunnelquerschnittsfläche in Ebene 1 und 2: <b>51,21 m<sup>2</sup></b>	in [m <sup>2</sup> ]

Der eingebrachte Schub im Tunnel  $F_{SV}$  kann auch auf Basis des Standschubes (entweder aus dem Datenblatt bzw. im Rahmen einer Ventilatorabnahme im Werk des Herstellers gemessen) mit Gleichung (3-20) berechnet werden:

$$F_{SV} = F_0 \cdot k \cdot \left(1 - \frac{u_3}{u_{SV}}\right) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3-20)$$

$F_0$	Standschub des Strahlventilators bei Referenzdichte	in [Pa]
$k$	Schubminderung auf Grund der Einbausituation	in [-]
$u_3$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	in [m/s]
$u_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	in [m/s]
$\rho$	Lufddichte im Tunnel	in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Referenzdichte für Standschub: <b>1,28 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	in [-]

Setzt man nun Gleichung (3-19) in Gleichung (3-20) ein und formt den Ausdruck um, kann folgende Beziehung definiert werden:

$$\frac{\Delta p_{SV} \cdot A_1}{n} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} = F_0 \cdot k \cdot \left(1 - \frac{u_3}{u_{SV}}\right) \quad (3-21)$$

Der Term auf der linken Seite der Gleichung (3-21) definiert den gemessenen, effektiv eingebrachten Schub je Strahlventilator bei Referenzdichte  $\rho_0$  und entspricht dem Standschub bei Referenzdichte  $F_0$  inkl. Schubminderung auf Grund des Einbaus und der Relativgeschwindigkeit zwischen Tunnelgrundströmung  $u_3$  und Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators  $u_{SV}$ .

Der gemessene eingebrachte Schub je Strahlventilator bei Referenzdichte kann als  $F_{SV\_0}$  zusammengefasst werden, wodurch sich Gleichung (3-21) weiter vereinfachen lässt.

$$F_{SV\_0} = F_0 \cdot k \cdot \left(1 - \frac{u_3}{u_{SV}}\right) \quad (3-22)$$

### 3.4.3 Bestimmung der Messunsicherheiten

Zur Bestimmung der Messunsicherheiten werden die Messgrößen welche in die Berechnung des eingebrachten Schubes einfließen entsprechend der Messunsicherheiten der verwendeten Messgeräte (Tabelle 3-13) so kumuliert, dass der errechnete Schub einen Extremwert nach oben und nach unten annimmt:

$$\textit{Beispiel:} \quad D_{h1\_max} = D_{h1+0,2} \textit{ bzw. } D_{h1\_min} = D_{h1-0,1}$$

Dies stellt eine absolute Maximal-/Minimalbetrachtung dar, die zur Abschätzung der möglichen Fehler in den Ergebnissen dienen soll.

Die Ausgangsgleichung für die Bestimmung der Grenzwerte (maximal- und minimal möglicher Wert) aufgrund der Messunsicherheiten wurde durch Einsetzen der Gleichungen (3-1) und (3-17) in (3-21) und einigen Vereinfachungen erhalten. Der Maximalwert aufgrund der Messunsicherheiten kann mit Gleichung (3-23) und (3-24) und der Minimalwert mit Gleichung (3-25) und (3-26) bestimmt werden.

$$F_{SV\_0\_max} = \frac{A_{1\_max} \cdot \rho_0 \cdot [2 \cdot \Delta p_{12\_max} \cdot R_L \cdot (273,15 + t_{3\_max}) + \zeta_{max} \cdot u_{3\_max}^2 \cdot p_{abs\_3\_max}]}{2 \cdot p_{abs\_3\_min} \cdot n} \quad (3-23)$$

$$\zeta_{max} = \left( \frac{\lambda_{max} \cdot L_{12\_max}}{D_{h1\_min}} + \zeta_{N\_max} \right) \quad (3-24)$$

$$F_{SV\_0\_min} = \frac{A_{1\_min} \cdot \rho_0 \cdot [2 \cdot \Delta p_{12\_min} \cdot R_L \cdot (273,15 + t_{3\_min}) + \zeta_{min} \cdot u_{3\_min}^2 \cdot p_{abs\_3\_min}]}{2 \cdot p_{abs\_3\_max} \cdot n} \quad (3-25)$$

$$\zeta_{min} = \left( \frac{\lambda_{min} \cdot L_{12\_min}}{D_{h1\_max}} + \zeta_{N\_min} \right) \quad (3-26)$$

Für die Länge des Messpfades  $L_{12}$  wurde eine Abweichung von  $\pm 0,2$  m, für den hydraulischen Durchmesser eine Abweichung von  $\pm 2\%$  und für die Querschnittsfläche eine Abweichung von  $\pm 1\%$  angenommen.

Unter Beachtung der Messunsicherheiten der Messgeräte gemäß Tabelle 3-13 und der angenommen geometrischen Unsicherheiten beträgt das Gesamtspiel aller Messungen somit maximal  $\pm 2,7\%$ .

### 3.4.4 Mess- und Berechnungsergebnisse

#### 3.4.4.1 Strömungsverluste Nische / Tunnel

Der Gesamtwiderstandsbeiwert der Messstrecke kann aus dem gemessenen Druckverlust  $\Delta p_{12}$  über die Messstrecke  $L_{12}$  gemäß Kapitel 3.4.2.1.2, Gleichung (3-17) errechnet werden.

Da sich in der Messstrecke Süd keine Nische oder Pannenbucht in der Messstrecke Süd befindet ( $\zeta_N=0$ ) kann der Gesamtwiderstandsbeiwert in diesem speziellen Fall auf den Rohrreibungskoeffizienten  $\lambda$  reduziert werden.

Die Länge der Messstrecke  $L_{2a}$  betrug für das Frischluftimpulssystem SÜD 405 m ( $\pm 0,2$  m). Die aufgezeichnete Längsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt betrug während der Reibungsmessung 4,36 m/s ( $\pm 0,1$  m/s), die gemessene Druckdifferenz über die Strecke lag bei 9,32 Pa ( $\pm(0,5\%+0,3)$ ).

Die Querschnittsfläche des Tunnels beträgt im Bereich der beiden Frischluftimpulssysteme jeweils 58,46 m<sup>2</sup> ( $\pm 1,0\%$ ), der Umfang liegt bei 32,96 m ( $\pm 1,0\%$ ). Daraus ergibt sich ein hydraulischer Durchmesser von 7,09 m ( $\pm 2\%$ ).

Die Lufddichte wurde für einen gemessenen barometrischen Luftdruck von 933,16 mbar und eine aufgezeichnete Lufttemperatur von 14,58°C gemäß Gleichung (3-1) ermittelt.

Für die gemessene Rohrreibungszahl im Bereich der Messstrecke SÜD ergibt sich daraus ein Wert von  $\lambda = 0,0153$  mit einer Messunsicherheit von -10% / +11%. Vergleicht man den errechneten Wert mit jenem aus den Untersuchungen zu den Impulssystemen (siehe Kapitel 3.3.2.1.2) so erkennt man, dass der vorliegende Reibungsbeiwert fast 50% höher ist als bei den Impulssystemen errechnete.

Der Grund für diese relativ große Abweichung liegt (neben möglichen Messunsicherheiten) darin, dass der Tunnelquerschnitt im Bereich der Strahlöffner (nur Abluftkanal) gänzlich anders aussieht als im Bereich der Portale, wo die Impulsklappen situiert sind (Vollquergelüftete Bereiche).

Die Berechnungswerte und Messergebnisse für die Strahlöffnergruppe SÜD sind in Tabelle 3-18 zusammengefasst:

Tabelle 3-18: Ermittlung Streckenverluste – Strahlöffnergruppe SÜD

$L_{12}$	$D_{ht}$	$\rho_3$	$u_3$	$\Delta p_{12}$	$\lambda$
[m] ( $\pm 0,2$ )	[m] ( $\pm 2\%$ )	[kg/m <sup>3</sup> ] ( $\pm 0,16\%$ )	[m/s] ( $\pm 0,1$ )	[Pa] ( $\pm(0,5\%+0,3)$ )	(-10%/+11%)
405,0	7,09	1,1298	4,36	9,32	0,0153

Für das Frischluftimpulssystem NORD erfolgte die Berechnung analog, wobei die Länge der Messstrecke  $L_{2a}$  in diesem Fall 504 m ( $\pm 0,2$  m) betrug, die gemessene Längsgeschwindigkeit im Querschnitt lag bei 3,15 m/s ( $\pm 0,1$  m/s). Die aufgezeichnete Druckdifferenz über die Strecke beträgt 13,43 Pa ( $\pm(0,5\%+0,3)$ ).

Der barometrische Luftdruck während der Messung lag bei 933,09 mbar, die Lufttemperatur bei 18,04°C.

Für den gemessenen Gesamtwiderstandsbeiwert (Reibung + Pannenbucht) im Bereich der Messstrecke NORD ergibt sich daraus ein Wert von  $\zeta_{ges} = 2,425$  mit einer Messunsicherheit von -9% / +10%.

Die Berechnungswerte und Messergebnisse für die Strahllüftergruppe Nord sind in Tabelle 3-19 zusammengefasst:

Tabelle 3-19: Ermittlung Streckenverluste – Strahllüftergruppe NORD

$L_{12}$	$D_{h1}$	$\rho_3$	$u_2$	$\Delta p_{12}$	$\zeta_{ges}$
[m] ( $\pm 0,2$ )	[m] ( $\pm 2\%$ )	[kg/m <sup>3</sup> ] ( $\pm 0,16\%$ )	[m/s] ( $\pm 0,1$ )	[Pa] $\pm(0,5\%+0,3)$	(-9%/+10%)
504,0	7,09	1,1163	3,15	13,43	2,425

Der Gesamtwiderstandsbeiwert  $\zeta_{ges}$  setzt sich (siehe Gleichung (3-17)) aus der Wandreibung (zu Folge des Reibungsbeiwert  $\lambda$ ) und einem Verlustbeiwert  $\zeta_N$  für Querschnittsänderungen im Bereich der Nische zusammen. Geht man davon aus, dass der reine Reibungsbeiwert gleich hoch ist wie im Bereich der Strahllüftergruppe SÜD ( $\lambda = 0,0153$ ), so kann aus dieser Beziehung der Verlustbeiwert der Pannenbucht  $\zeta_N$  ermittelt werden.

Der auf diese Weise errechnete Verlustbeiwert  $\zeta_N$  liegt in diesem Fall bei 1,34.

### 3.4.4.2 Eingebrachter Schub

Der eingebrachte Schub der Strahlventilatoren wurde anhand der gemessenen Druckdifferenzen, welche bereits um die Verluste der Messstrecke (Reibung und Pannenbucht) korrigiert wurden, und des Tunnelquerschnitts  $A_1 = 58,46 \text{ m}^2$  berechnet. Der so erhaltene Schub wurde auf die Referenzdichte gebracht ( $F_{SV_0}$ ) und beinhaltet bereits die Verluste aufgrund der Einbausituation und der Relativgeschwindigkeit zwischen Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators und der Tunnelgrundströmung.

Um die Ergebnisse der einzelnen Messungen miteinander vergleichen zu können, wurde während den Messungen darauf geachtet, dass die Tunnelgrundströmung bei jeder Vermessung annähernd denselben Wert annahm. Zudem wurde eine Tunnelgrundströmung gewählt, die hinsichtlich eines Brandfalles einem realitätsnahen Wert entspricht (2-2,5 m/s).

Tabelle 3-20: effektiv eingebrachter Schub der Strahlventilatoren – Strahllüftergruppe NORD

aktive SL	Grundströmung	Luftdichte		$\Delta p_{sv}$	n	$F_{SV_0} = F_0 \cdot k \cdot (1 - u_T / u_{SV})$
		$\rho$ (lokal)	$\rho_0$			
	[m/s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Pa]	[-]	[N] bei $\rho_0$	
	( $\pm 0,1$ )	( $\pm 0,16\%$ )	( $\pm 0,0$ )	( $\pm 1,6\%$ )	( $\pm 0,0$ )	( $\pm 2,7\%$ )
SL 5.1	2,39	1,1137	1,28	31,79	1	<b>2136,08</b>
SL 4.1 bis 5.1	2,59	1,1142	1,28	55,53	2	<b>1864,63</b>
SL 3.1 bis 5.1	2,54	1,1137	1,28	93,89	3	<b>2102,83</b>
SL 2.2 bis 5.1	2,57	1,1136	1,28	128,14	4	<b>2152,61</b>
SL 2.1 bis 5.1	2,86	1,1136	1,28	158,47	5	<b>2129,71</b>

Tabelle 3-20 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der Messungen für die Strahllüftergruppe NORD. Die Auswertung hat ergeben, dass der effektiv eingebrachte Schub pro Strahlventilator ( $F_{SV_0}$ ), bezogen auf die Referenzdichte von 1,28 kg/m<sup>3</sup>, minimal 1865 N und maximal 2153 N beträgt. Daraus ergibt sich ein durch die Ventilatoren der Strahllüftergruppe NORD eingebrachter, effektiver Gesamtschub von 10386 N.

Tabelle 3-21: effektiv eingebrachter Schub der Strahlventilatoren – Strahllüftergruppe SÜD

aktive SL	Grundströmung	Luftdichte		$\Delta p_{sv}$	n	$F_{sv_0} = F_0 \cdot k \cdot (1 - u_T/u_{sv})$
		$\rho$ (lokal)	$\rho_0$			
	[m/s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Pa]	[-]	[N] bei $\rho_0$	
	(±0,1)	(±0,16%)	(±0,0)	(±1,6%)	(±0,0)	(±2,7%)
SL 13.1	2,38	1,1291	1,28	32,32	1	<b>2141,84</b>
SL 12.1 bis 13.1	2,36	1,1290	1,28	63,66	2	<b>2109,62</b>
SL 11.1 bis 13.1	2,24	1,1292	1,28	96,03	3	<b>2121,28</b>
SL 11.1 bis 14.1	n.A.	n.A.	1,28	n.A.	4	<b>n.A.</b>

Tabelle 3-21 enthält die Zusammenfassung der Mess- und Berechnungsergebnisse für die Strahllüftergruppe SÜD. Sie zeigt, dass der effektiv eingebrachte Schub je Strahlventilator ( $F_{sv_0}$ ) zwischen 2110 N (Minimum) und 2142 N (Maximum) bei Referenzdichte ( $\rho_0 = 1,28 \text{ kg/m}^3$ ) beträgt. Daraus ergibt sich ein durch die Ventilatoren der Strahllüftergruppe SÜD insgesamt eingebrachter Gesamtschub von 6374 N.

*Strahllüfter SL 14.1 durfte für die Messungen auf Grund des vertauschten Drehfelds nicht aktiviert werden wodurch maximal der insgesamt 4 Ventilatoren gelaufen sind.*

Bei den vermessenen Strahlventilatoren handelt es sich zwar um sogenannte ‚vollreversible‘ Modelle, auf Grund der Schaufelgeometrie verfügen jedoch auch diese über eine Vorzugsrichtung mit etwas höherem Standschub. Um den ungünstigsten Fall abzudecken erfolgten alle Messungen daher für die schwächere Reversierrichtung. Der Standschub bei Reversierbetrieb (bezogen auf die Referenzdichte von  $1,28 \text{ kg/m}^3$ ) beträgt gemäß Datenblatt des Herstellers  $F_0=3110 \text{ N}$ .

Setzt man den jeweils tatsächlich eingebrachten Schub  $F_{sv_0}$  aus Tabelle 3-20 bzw. Tabelle 3-21 ins Verhältnis zum theoretisch einbringbaren Standschub  $F_0$  erhält man einen Wirkungsgrad, den Schub- / Impulsumsetzungsfaktor  $\eta$  (siehe Gleichung (3-27)):

$$\eta = \frac{F_{sv_0}}{F_0} = k \cdot \left(1 - \frac{u_3}{u_{sv}}\right) \quad (3-27)$$

Dieser Impulsumsetzungskoeffizient stellt eine Art Gesamtwirkungsgrad dar und setzt sich aus einem Einbaufaktors  $k$  und einem Korrekturterm, welcher die Relativgeschwindigkeit zwischen Ausblasstrahl und Strömung im Tunnel berücksichtigt, zusammen.

Die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren wurde mit Hilfe zweier in Kapitel 3.4.1.3 beschriebenen Flügelsonden, welche nach dem Staudruckprinzip arbeiten, während der Messungen an der Strahllüftergruppe NORD in den Ventilatoren SL 5.1 und SL 3.1 aufgezeichnet. Die für die weiteren Auswertungen herangezogene Geschwindigkeit  $u_{sv}$  stellt den Mittelwert der Messwerte der beiden Ventilatoren dar.

Die Messung der Ausblasgeschwindigkeit in der Strahllüftergruppe SÜD erfolgte an Ventilator SL 14.1. Da dieser auf Grund einer falschen Verkabelung (Drehfeld) aus Sicherheitsgründen nicht aktiviert werden durfte und ein Umschließen aus zeitlichen Gründen (es stand nur eine Nachtsperre für die Messungen zur Verfügung), stehen keine Daten bezüglich der Ausblasgeschwindigkeit zur Verfügung. Alle Strahlventilatoren im Karawankentunnel sind jedoch baugleich und deren Einbausituation nahezu ident.

Um eine Auswertung analog zur Strahllüftergruppe Nord zu ermöglichen, wurde daher der Mittelwert über alle 5 Messungen der Gruppe NORD herangezogen.

Tabelle 3-22 und Tabelle 3-23 zeigen eine Zusammenfassung der zur Berechnung der Wirkungsgrad und Einbaufaktoren erforderlichen Größen sowie der Berechnungsergebnisse für die Strahllüftergruppe NORD bzw. SÜD.

Tabelle 3-22: errechneter Wirkungsgrad / Einbaufaktor – Strahllüftergruppe NORD

aktive SL	$F_{sv\_0}$	$F_0$	$\eta$	$u_3$	$u_{sv}^*$	$(1-u_3/u_{sv})$	$k$
	[N]	[N]	[-]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]
SL 5.1	2136,08	3110	0,69	2,39	33,64	0,93	0,74
SL 4.1 bis 5.1	1864,63	3110	0,60	2,59	33,49	0,92	0,65
SL 3.1 bis 5.1	2102,83	3110	0,68	2,54	33,47	0,92	0,73
SL 2.2 bis 5.1	2152,61	3110	0,69	2,57	33,50	0,92	0,75
SL 2.1 bis 5.1	2129,71	3110	0,68	2,86	33,55	0,91	0,75

\*... Mittelwert der beiden Sonden in Strahllüfter SL 5.1 und SL 3.1

Tabelle 3-23: errechneter Wirkungsgrad / Einbaufaktor – Strahllüftergruppe SÜD

aktive SL	$F_{sv\_0}$	$F_0$	$\eta$	$u_3$	$u_{sv}$	$(1-u_3/u_{sv})$	$k$
	[N]	[N]	[-]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]
SL 13.1	2141,84	3110	0,69	2,38	33,53*	0,93	0,74
SL 12.1 bis 13.1	2109,62	3110	0,68	2,36	33,53*	0,93	0,73
SL 11.1 bis 13.1	2121,28	3110	0,68	2,24	33,53*	0,93	0,73
SL 11.1 bis 14.1	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.

\*... Mittelwert der Messungen 1 bis 5 der Strahllüftergruppe NORD

Für die Strahllüftergruppe NORD ergeben sich somit Impulsumsetzungskoeffizienten  $\eta$  zwischen 0,60 im schlechtesten und 0,69 im günstigsten Fall. Bei der Strahllüftergruppe SÜD liegen die ermittelten Werte zwischen 0,68 und 0,69.

Insgesamt zeigt sich, dass sowohl der effektiv eingebrachte Schub je Strahlventilator  $F_{sv\_0}$  als auch die in weiterer Folge abgeleiteten Größen  $\eta$  und  $k$  über alle Messungen und beide Strahllüftergruppen hinweg äußerst konstant sind. Einzig Messung 2 in der Strahllüftergruppe NORD liefert etwas niedrigere Werte (ca. 12%), was eventuell darauf hindeutet, dass der Standschub von Ventilator SL 4.1 gegenüber allen anderen leicht verringert ist.

Zieht man jedoch die erzielten effektiven Gesamtschübe von 10386 N (Strahllüftergruppe NORD) bzw. 6373 N (Strahllüftergruppe SÜD) heran und ermittelt daraus einen durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad je Lüftergruppe, so weisen die Werte von 0,67 (NORD) bzw. 0,68 (SÜD) keine eklatanten Abweichungen zueinander auf.

Da die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren gemessen wurde und die Grundströmung im Tunnel bekannt ist, kann auf Basis von Gleichung (3-27) somit auch der sogenannte Einbau- oder Installationsfaktor  $k$  ermittelt werden. Dieser berücksichtigt alle Schubverluste welche durch den Einbau des Strahlventilators selbst (Wandabstand, Nischeneinbau, etc...) hervorgerufen werden und liegt zwischen 0,65 und 0,75 für die Strahllüftergruppe NORD bzw. zwischen 0,73 und 0,74 für die Strahllüftergruppe SÜD.

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass bei den Messungen jeweils unterschiedlich viele Strahlventilatoren aktiv waren und der Schub pro Strahlventilator eine rein rechnerische Aufteilung darstellt.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die ermittelten Schübe, sowie die daraus abgeleiteten Wirkungsgrade und Einbaufaktoren für die während der Messungen vorherrschenden resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnelfahrraum (im Schnitt ca. 2,50 m/s) gelten. Bei davon abweichenden Längsgeschwindigkeiten im Tunnel können sowohl der effektiv eingebrachte Schub sowie auch alle davon abgeleiteten Werte von den hier dargestellten Ergebnissen abweichen.

In Abbildung 3-18 (Strahllüftergruppe Nord) bzw. Abbildung 3-19 (Strahllüftergruppe Süd) wurde zusätzlich auch (für unterschiedliche Anzahl an aktiven Ventilatoren in der Strahllüftergruppe) der gemessene, effektiv eingebrachte Schub je Strahlventilator dem Standschub aus dem Datenblatt (jeweils bei Referenzdichte  $\rho_0=1,28 \text{ kg/m}^3$  grafisch gegenübergestellt. Die Fehlerindikatoren an den grünen Balken stehen für die zu erwartende Messunsicherheit ( $\pm 2,7\%$ ) welche bei der Ermittlung des effektiv eingebrachten Schubs auftreten können.

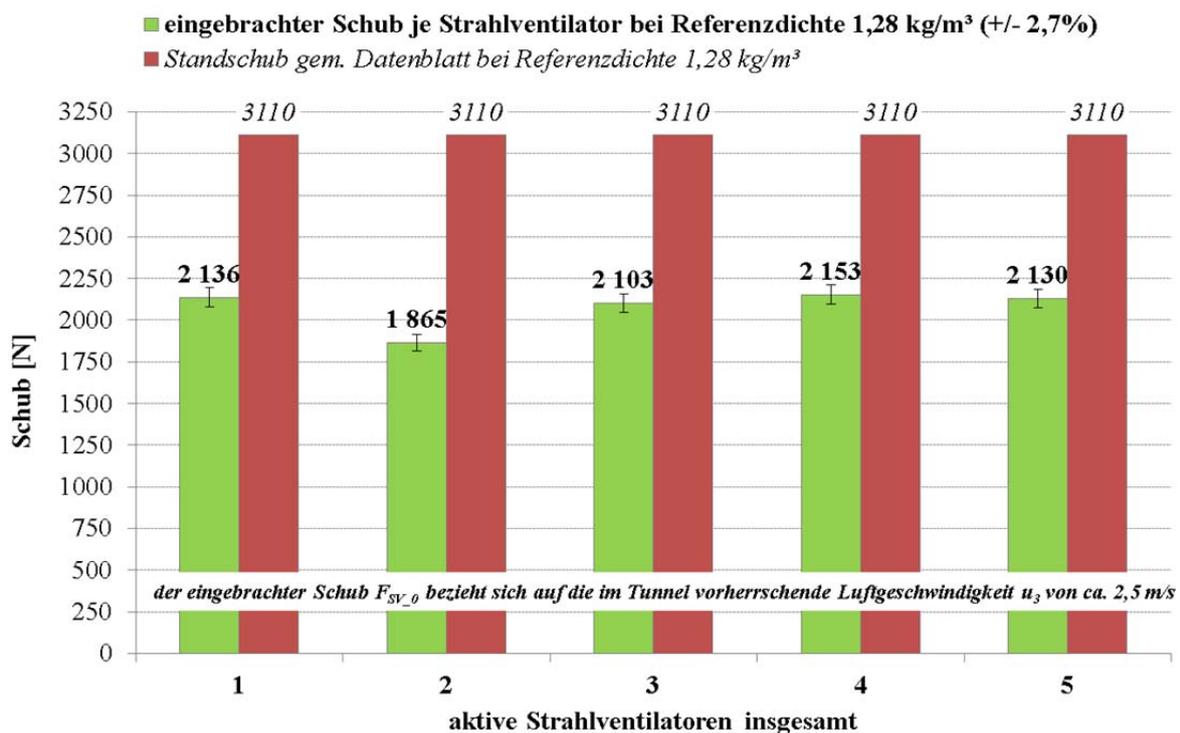


Abbildung 3-18: Gegenüberstellung eingebrachter Schub je Strahllüfter zu Standschub, jeweils bei Referenzdichte  $\rho_0 = 1,28 \text{ kg/m}^3$ , Strahllüftergruppe Nord

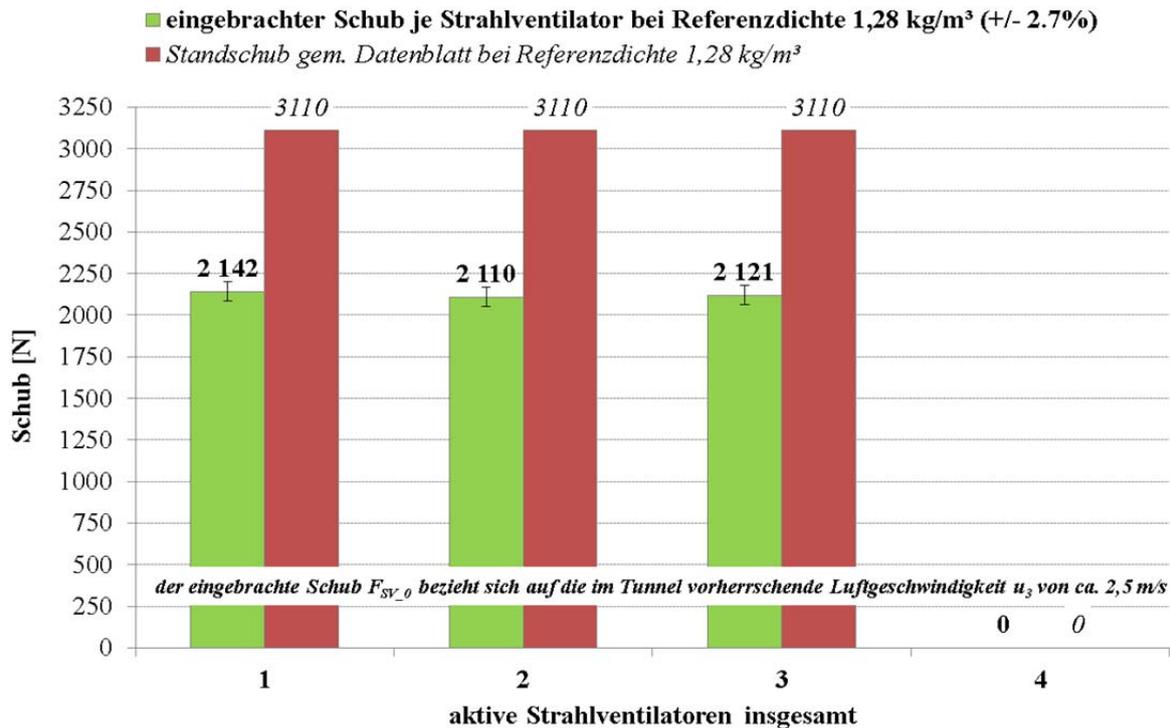


Abbildung 3-19: Gegenüberstellung eingebrachter Schub je Strahllüfter zu Stand Schub, jeweils bei Referenzdichte  $\rho_0=1,28 \text{ kg/m}^3$ , Strahllüftergruppe Süd

### 3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Egal ob es sich um ein Lüftungssystem mit oder ohne Absaugung handelt ist es auf jeden Fall erforderliche eine Längsströmung im Tunnelfahrraum erzeugen oder diese entsprechend beeinflussen zu können. Nur auf diese Weise ist es möglich die geforderten Lüftungsziele so schnell wie möglich erreichen und anschließend auch halten zu können.

Dazu ist es erforderlich Schub in das System einzubringen, in den meisten Fällen erfolgt dies mit Hilfe von Strahlventilatoren oder Injektions- / Saccardosystemen. In beiden Fällen ist es jedoch immer nur möglich einen gewissen Teil des installierten Schubs auch effektiv nutzen zu können. Diese Differenz zwischen theoretisch verfügbarem und tatsächlich einbringbarem Schub wird durch einen entsprechenden Wirkungsgrad, den sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten, ausgedrückt.

Diese Faktoren bzw. Koeffizienten sind projekt- und anlagenspezifisch und somit während der Planungsphase nicht bekannt, müssen jedoch bereits berücksichtigt werden, damit schlussendlich genügend Schub und Leistung vorhanden ist um die Lüftungs- und Planungsziele erreichen zu können. In den meisten Fällen werden dafür Erfahrungs- bzw. Literaturwerte herangezogen, bei heikleren Anordnungen wird zunehmend auch auf Strömungssimulationen zurückgegriffen.

Literaturwerte, sofern für viele Konstellationen überhaupt vorhanden, stammen jedoch in aller Regel aus Modellversuchen und erfassen oft nur einen Teil der tatsächlich vorhandenen Verluste, wodurch deren Übertragbarkeit auf ‚echte‘ Anlagen nur eingeschränkt möglich ist.

Es ist daher unabdingbar, den effektiv in ein System einbringbaren Schub im Rahmen der Inbetriebnahme eines solchen zu bestimmen. Nur so kann festgestellt werden ob die in der Planung getroffenen Annahmen auch tatsächlich an der realen Anlage erfüllt werden können.

Da es zur Messung des effektiv eingebrachten Schubs keine standardisierten Verfahren oder

Richtlinien gibt, wurden für die beiden häufigsten Methoden der Schubeinbringung (Impulssysteme und Strahlventilatoren) Messkonzepte gezeigt, die zudem leicht an nahezu jede Anlage angepasst werden kann.

### 3.5.1 Zusammenfassung Schubeinbringung von Impulssystemen

Für die beiden Impulssysteme des Karawankentunnels wurde der effektiv einbringbare Schub für 4 unterschiedliche Strömungszustände gemessen:

- Beschleunigung der Grundströmung (Klappenwinkel zwischen 30 und 90°)
- Abbremsen der Grundströmung (Klappenwinkel zwischen 90 und 145°)
- Beschleunigung der Grundströmung (Klappenwinkel zwischen 90 und 145°)
- Abbremsen der Grundströmung (Klappenwinkel zwischen 30 und 90°)

Beim Abbremsen der Grundströme wurde darauf geachtet, dass es zu keiner Volumenstromaufteilung gekommen ist.

Um die gemessenen Druckdifferenzen im Rahmen der Auswertung entsprechend korrigieren zu können, wurde zudem eine Messung zur Bestimmung der Reibungsverluste in der Messstrecke durchgeführt.

Um einen Vergleich anstellen zu können, wurde zusätzlich auch der theoretisch maximal einbringbare Schub an Hand des Impulssatzes ermittelt und alle dafür erforderlichen Messgrößen während der Tests aufgezeichnet. Diese Messgrößen erlaubten außerdem die Berechnung des sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten  $k_{mx}$ .

Die Messungen lieferten für gleiche Strömungszustände und Klappenstellungen sehr ähnliche Schubwerte, die minimalen Unterschiede sind in erster Linie durch nicht vollständig idente Randbedingungen (Grundströmung, Druckverhältnisse an den Portalen) begründet.

Die ermittelten Impulsumsetzungskoeffizienten lagen für das Impulssystem SÜD zwischen 0,88 und 0,93 für den Beschleunigungsfall und zwischen 1,16 und 1,25 für den Abbremsfall. Beim Impulssystem NORD lagen sie zwischen 0,88 und 0,92 für eine Beschleunigung und zwischen 1,18 und 1,24 für ein Abbremsen der Grundströmung.

Wird die Grundströmung in einem Tunnel mit Hilfe eines Impulssystems also beschleunigt, ist der Impulsumsetzungskoeffizient kleiner 1,0 – der theoretisch maximal einbringbare Schub kann, wie erwartet, nur zu einem Teil umgesetzt und effektiv genutzt werden.

Wird die Grundströmung im Tunnel hingegen damit abgebremst, sind die zu erwartenden Impulsumsetzungskoeffizienten größer 1,0 – es kann ‚mehr‘ Schub umgesetzt werden, als theoretisch (anhand des Impulssatzes) eingebracht werden kann. Grund hierfür ist der Luftstrahl aus dem Impulssystem, der über der Fahrbahn umgelenkt wird und dadurch hohe zusätzliche Reibungskräfte entgegen der Strömung erzeugt [Pospisil, et al., 2010]. Diese Reibungskräfte bremsen die Luftsäule zusätzlich zum eingebrachten Impuls.

Vergleicht man die aus den Messungen ermittelten Impulsumsetzungskoeffizienten mit Werten aus der Literatur wie zum Beispiel [Pospisil, et al., 2010] oder [Sutterlüty, 2012] welche auf Basis von CFD-Berechnungen für ähnliche Fälle und Randbedingungen ermittelt wurden, so liegen die gemessenen Werte voll im Bereich der in der Literatur angegebenen und verfügbaren Werte. Hierbei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die Messunsicherheiten auf Grund der Verkettung einer solch hohen Anzahl an erforderlichen Messgrößen zur Berechnungen des Impulsumsetzungskoeffizienten (im Vergleich zur Messung des effektiv eingebrachten Schubs) relativ hoch sind (ca. 6 bis 12%).

### 3.5.2 Zusammenfassung Schubeinbringung von Strahlventilatoren

An den beiden Strahllüftergruppen des Karawankentunnels (NORD mit 5 Strahlventilatoren, SÜD mit 4 Strahlventilatoren) wurden auch Messungen zur Bestimmung des effektiv eingebrachten Schubs durch die Strahlventilatoren durchgeführt.

Auf Grund der äußerst kurzen Abstände der Strahlventilatoren zueinander (zum Teil unter 60 m), dem extremen Standschub (3110 N) und der äußerst ungünstigen Einbausituation der Lüfter neben einem neu durchgängig errichteten Abluftkanal stellt der Karawankentunnel diesbezüglich eine äußerst interessante Konstellation dar.

Da die Strahlventilatoren sich in einem gänzlich anderen Tunnelabschnitt wie die beiden Impulssysteme befinden und zudem auch der Regelquerschnitt deutlich abweicht, wurde auch für diesen Bereich eine Messung zur Bestimmung der Reibungskräfte innerhalb der späteren Messstrecken durchgeführt um die Ergebnisse später entsprechend korrigieren zu können.

Die gemessenen, effektiv eingebrachten Schübe lagen zwischen 2103 und 2153 N für die Strahlventilatoren der Gruppe NORD und zwischen 2110 und 2142 N für die Gruppe SÜD und zeigen somit ein prinzipiell äußerst gleichmäßiges Ergebnis. Einzig bei Messung 2 an der Strahllüftergruppe NORD wurde mit durchschnittlich 1865 N (insgesamt 2 Strahlventilatoren aktiv) ein etwas geringerer Wert (-12%) gemessen. Dies deutet darauf hin dass der Strahlventilator SL 4.1 einen etwas geringeren Schub einbringt als die übrigen Strahlventilatoren tun.

Bezieht man die gemessenen Schübe (bei Referenzdichte) auf den Standschub gemäß Datenblatt des Herstellers, ergibt sich der sogenannte Gesamtwirkungsgrad oder auch Impulsumsetzungskoeffizient  $\eta$ . Dieser liegt im vorliegenden Fall für beide Strahllüftergruppen durchwegs zwischen 0,67 und 0,69. Auch hier bildet Strahlventilator SL 4.1 mit einem Wirkungsgrad von 0,60 wieder den einzigen Ausreißer. Zieht man den gemessenen Gesamtschub an Stelle der (rechnerisch aufgespaltenen) Einzelschübe heran, ergibt sich ein Wirkungsgrad von 0,67 für die Strahllüftergruppe NORD bzw. 0,68 für die Strahllüftergruppe Süd.

Zusätzlich zum effektiv eingebrachten Schub wurde auch noch die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren mit Hilfe eigens dafür konstruierter Flügelsonden (Funktionsweise ähnlich einem Staurohr) in zwei Strahlventilatoren (SL 5.1 und SL 3.1) gemessen. Dadurch wurde es im Rahmen der Auswertung möglich vom bereits ermittelten Gesamtwirkungsgrad den sogenannten Einbaufaktor abzuspalten.

Dieser lag, für die im gegenständlichen Fall äußerst spezielle Einbausituation, zwischen 0,74 und 0,75 für die Strahlventilatoren der Gruppe NORD (Ausnahme SL 4.1 mit 0,65) und zwischen 0,73 und 0,74 für jene der Gruppe SÜD.

### 3.5.3 Schlussfolgerungen

Die gezeigten und angewendeten Messkonzepte sind sehr gut dazu geeignet den effektiv eingebrachten Schub von Impulssystemen und Strahlventilatoren mit relativ geringem Aufwand in einer fertigen Tunnelanlage zu ermitteln. Die dabei erzielten Messunsicherheiten liegen zwischen  $\pm 1,25\%$  und  $\pm 4,5\%$ , was für insgesamt durchaus belastbare Ergebnisse spricht.

Die gegenständlich zusätzlich durchgeführten Messungen zur Bestimmung des theoretisch maximal einbringbaren Schubs bei Impulssystemen diente dazu, analog zum Standschub der Strahlventilatoren, eine Bezugsgröße zu schaffen und um entsprechende Vergleiche durchführen zu können. Zudem dienten die dafür benötigten Messgrößen zur Ermittlung des Impulsumsetzungskoeffizienten, welcher mit Literaturwerten und Simulationen verglichen

werden sollte. Zur Berechnung dieser Kenngrößen sind jedoch sehr viele Messwerte erforderlich, die Verkettung ihrer Messunsicherheiten führt insgesamt zu (im Vergleich zur Messung des effektiven Schubs) deutlich höheren Messunsicherheiten (zwischen  $\pm 6\%$  und  $\pm 12\%$ ). Der dafür insgesamt nicht unerhebliche, zusätzliche Messaufwand kann jedoch, wenn im Rahmen einer Inbetriebnahme ausschließlich der effektiv eingebrachte Schub bestimmt werden soll, komplett entfallen.

Die Messung der Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren wurde ebenfalls zusätzlich zur eigentlichen Schubmessung durchgeführt und diente dazu, den sogenannten Einbaufaktor  $k$  vom Gesamtwirkungsgrad abspalten zu können. Diese Messung stellt auf Grund der für den jeweiligen Ventilator anzufertigenden bzw. anzupassenden Messsonden und dem erheblichen Aufwand zum Ein- und Ausbau der Sonden ebenfalls einen massiven zusätzlichen Zeit- und Arbeitsaufwand dar. Liegen für die Strahlventilatoren der untersuchten Anlage Messprotokolle bzgl. der Ausblasprotokolle (vom Hersteller oder einem Prüfinstitut) vor, kann auch dieser für eine solche Berechnung herangezogen werden. Geht es, ähnlich wie bei den Impulssystemen bereits angesprochen, lediglich darum den effektiv erzielbaren Schub / Gesamtschub in der Anlage zu messen, kann auch dieser Zusatzaufwand komplett entfallen.

Messungen zur Bestimmungen des effektiv einbringbaren Schubs sollten zukünftig, insbesondere bei Tunneln mit ‚besonderen‘ Anlagenverhältnissen (wie z.B. bei Lüfternischen, Unterzügen, extremer Beschilderung, etc.) zum festen Bestandteil des Inbetriebnahmeprozederes werden. Dadurch ist sichergestellt, dass der zum Erreichen der Lüftungsziele benötigte Schub tatsächlich an der Anlage verfügbar ist. Zusätzlich können die dabei ermittelten Wirkungsgrade und Einbaufaktoren in andere bzw. zukünftige Projekte einfließen und die bislang damit immer verbundenen Unsicherheiten sukzessive reduziert werden.

## 4 Ausführung / Inbetriebnahme von Reglern zur Lüftersteuerung

### 4.1 Allgemeines

Im Brandfall fällt der Regelung der Längsgeschwindigkeit in einem Tunnel allerhöchste Bedeutung zu. Sie stellt den Schlüsselfaktor dar um bestmögliche Sicht- und Fluchtbedingungen während der Selbstrettungsphase (in der Regel die ersten 20 Minuten nach Eintritt des Brandereignisses) schaffen und aufrechterhalten zu können [Sturm, Beyer, & Rafiei, 2015].

Geschlossenschleifige Regelkreise entsprechen in der Ventilatorsteuerung von Tunnellüftungen deshalb heutzutage dem Stand der Technik. Im Laufe der letzten Jahre wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten zur Regelung der Längsgeschwindigkeit entwickelt. Diese reichen von einfachen Ein-/Ausschaltvorgängen bis hin zu komplexen PI- oder PID- Regelalgorithmen.

In Österreich kommen zur Ventilatorsteuerung und Regelung der Längsgeschwindigkeit derzeit meist Schwellwertschaltungen (eine einfache Form von Mehrpunktregler) zum Einsatz. Bei Zwei- und Mehrpunktreglern kann der eigentliche Sollwert jedoch niemals dauerhaft sondern immer nur vorübergehend erreicht werden. Der Istwert pendelt, je nach Einstellung des Reglers und abhängig von der Trägheit der Regelstrecke selbst, mehr oder weniger stark um die Sollwertvorgabe. Diese Schwankungen der Längsgeschwindigkeit können jedoch die Rauchausbreitung und somit in weiterer Folge die Sichtbedingungen negativ beeinflussen

Sinkt die Längsgeschwindigkeit vorübergehend zu stark ab, kann es (abhängig von der Längsneigung des Tunnels) dazu kommen dass die kritische Geschwindigkeit unterschritten wird, was eine Rauchausbreitung entgegen der eigentlichen Strömungs- und Entlüftungsrichtung (sogenannten ‚backlayering‘) zur Folge hat. Im schlimmsten Fall kann es sogar zu einer zeitweisen Strömungsumkehr kommen.

Übersteigt die Geschwindigkeit im Tunnel den gewünschten Bereich hingegen zeitweilig zu stark kann eine vorhandene Schichtung der heißen Rauchgase ge- oder gar zerstört werden. Dadurch verschlechtern sich die Sichtbedingungen von Personen stromabwärts des Brandes wesentlich früher und schneller, was die Selbstrettung in diesen Bereichen erschwert.

Bei Lüftungssystemen mit Absaugung kann ein zu starkes Schwanken der Längsgeschwindigkeit dazu führen, dass das gewünschte Zuströmverhältnis nicht mehr eingehalten wird, im Extremfall kann die Absaugstelle sogar unterströmt werden.

Mit PI- bzw. PID-Reglern hingegen können diese Schwankungen der Längsgeschwindigkeit während des Starts der Lüftungsanlage und während des anschließenden Regelprozesses gering gehalten werden. Diese werden hierzulande jedoch aktuell nur sehr vereinzelt in der Lüftungssteuerung eingesetzt, meist in Verbindung mit Anlagen die über drehzahlregelte Ventilatoren verfügen.

PI(D)-Regler bieten einige wesentliche Vorteile gegenüber Schwellwertschaltungen:

- Der Sollwert kann stabil und dauerhaft erreicht werden.
- Das Regelverhalten ist wesentlich weniger von den äußeren Bedingungen (barometrische Druckdifferenzen, Wind, ...) abhängig.
- Führungs- und Störverhalten können wesentlich besser und gezielter eingestellt werden.

Diese Vorteile besitzt der PI(D)-Regler jedoch nur dann, wenn seine Parameter auf die jeweilige Regelstrecke entsprechend sorgfältig abgestimmt werden.

## 4.2 Aufgabenstellung/Ziel der Messungen

In den meisten Fällen erfolgt die Einstellung von Reglern heute nach wie vor auf Basis von Erfahrungswerten vorangegangener, ‚ähnlicher‘ Projekte und in weiterer Folge nach dem Prinzip ‚trial and error‘. Diese Vorgehensweise ist zeitaufwändig und führt in den allermeisten Fällen zu nicht optimal an die Strecke angepassten und eingestellten Reglern. Die längjährige Erfahrung zeigt jedoch dass ein ungünstig eingestellter PI(D)-Regler in vielen Fällen zu deutlich schlechteren Ergebnissen führt als eine gut parametrierter Schwellwertschaltung.

Aus diesem Grund gab es in den vergangenen Jahren in der Schweiz bereits recht detaillierte Untersuchungen zu diesem Thema [Altenburger, Riess, & Brandt, 2013]. Darin wurden unterschiedliche Ausführungen von kontinuierlichen Reglern (PI, PID, modellprädikative Regelung/MPC und eine modellbasierte, schrittweise Berechnung der benötigten Anzahl an Strahlventilatoren) betrachtet und miteinander verglichen. Die durchgeführten Betrachtungen und Simulationen zeigen, dass der klassische PI-Regler, insbesondere unter Berücksichtigung des jeweils damit verbundenen Umsetzungsaufwands, für den konkreten Fall der Tunnellüftungsanlage das günstigste Nutzen-zu-Aufwand-Verhältnis bringt. Die Betrachtungen bleiben jedoch durchwegs theoretisch und wurden an Hand von vereinfachten physikalisch-mathematischen Modellen durchgeführt. Die Übertragbarkeit auf bzw. Umsetzung und Tests an realen Anlagen fehlen in diesen Studien jedoch komplett. Zudem werden zwar einige mögliche Probleme bei einer Umsetzung (insbesondere bei fehlender Möglichkeit einer Drehzahlregelung der Strahlventilatoren) erwähnt, gleichzeitig werden jedoch keine konkreten Lösungsansätze erarbeitet oder entwickelt. Systemintegratoren und Anlagenbetreiber fordern zudem möglichst einfache und robuste Lösungen.

Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist es daher ein einfaches, nachvollziehbares und allgemein anwendbares Inbetriebnahme- und Parametrierschema für PI-Regler in Tunnellüftungsanlagen zu finden, welches, unter Berücksichtigung der gesamten Regelstreckencharakteristik, eine zielgerichtete Erstparametrierung und anschließenden Optimierung für sowohl ein ansprechendes Führungs- als auch Störverhalten ermöglicht.

Die Vorgehensweise soll für alle üblichen System- und Anlagentypen geeignet sein. Insbesondere Anlagen mit ausschließlich netzbetriebenen Strahlventilatoren (also ohne Möglichkeit einer Drehzahlregelung) stellen hierbei eine große Herausforderung dar. Es werden deshalb auch konkrete steuerungstechnische Maßnahmen entwickelt und getestet, die eine Umsetzung an nahezu jeder Anlage ermöglichen sollen.

Da eine sinnvolle Parametrierung und Optimierung der Regelung erst an der voll funktionsfähigen Anlage, und somit erst sehr spät im Laufe des Inbetriebnahmeprozesses möglich ist, muss der Zeitaufwand dafür so gering wie möglich sein. Alle dafür erforderlichen Arbeiten sollten daher vor Ort und direkt an der Anlage mit geringem zusätzlichem Aufwand durchführbar sein.

### Die Aufgabenstellungen und Ziele der Untersuchungen im Detail:

- Experimentelle Streckenidentifikation durch Auswertung der Sprungantworten
  - Mit Hilfe des grafischen Wendetangentenverfahrens
  - Auf Basis der Zeitprozentkennwertmethode
- Ermittlung der Reglerparameter für 6 unterschiedliche, bekannte Einstellregeln
  - Zweite Einstellregel nach Ziegler/Nichols
  - 4 Einstellvarianten nach Chien, Hrones und Reswick

- Die für die Zeitprozentkennwertmethode hergeleiteten Regeln nach Latzel
- Vergleichende, unabhängige Tests für alle 6 Einstellungen an einer realen Tunnelanlage, getrennt nach
  - Führungsverhalten (Reaktion auf sprunghafte Änderung des Sollwerts)
  - Störverhalten (Reaktion auf sprunghafte Störungen von Außen)
- Auswertung und Beurteilung der Tests an Hand folgender Kriterien
  - Anregelzeit
  - Überschwingweite
  - Ausregelzeit
  - Anzahl und Häufigkeit der Schalthandlungen
- Ausführung eines PI-Reglers, Entwicklung geeigneter steuerungstechnischer Maßnahmen zur universellen Umsetzung an realen Anlagen
- Anwendung des daraus abgeleiteten Verfahrens und Erkenntnisse an zwei unterschiedlichen Systemen und Anlagentypen
  - Längslüftung mit teilweise drehzahlregelten Strahlventilatoren
  - Querlüftung mit ausschließlich netzbetriebenen Strahlventilatoren (Ein/Aus)

## 4.3 Experimentelle Identifikation der Regelstrecke

### 4.3.1 Aufzeichnung der Sprungantworten

Die Berechnung von Regelkreisen setzt üblicherweise die Kenntnis der mathematischen Beschreibung der einzelnen Elemente voraus. Um einen Regler entsprechend implementieren zu können muss man daher über den Typ der Regelstrecke sowie deren Parameter Bescheid wissen.

Bei einer experimentellen Identifikation einer Regelstrecke wird versucht eine mathematische Funktion (Übertragungsfunktion/-element) zu finden, die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße beschreibt. Dazu wird als Eingangsgröße eine Sprungfunktion aufgeschaltet und gleichzeitig der zeitliche Verlauf der Ausgangsgröße aufgezeichnet, was als sogenannte Sprungantwort bezeichnet wird.

Im vorliegenden Fall einer Tunnellüftung wurden dazu alle Strahlventilatoren zuerst deaktiviert und der Tunnel vorübergehend für Fahrzeuge aller Art gesperrt. Es stellt sich dann nach ein paar Minuten, bedingt durch die zu diesem Zeitpunkt vorherrschende natürliche Strömung, eine stationäre Anfangsgeschwindigkeit ein. Anschließend wird zum Zeitpunkt  $t=0$  eine vorab definierte Anzahl an Strahlventilatoren mit kürzestmöglicher Staffelung/Verzögerung aktiviert.

Theoretisch würden bei einer Sprungantwort alle Ventilatoren gleichzeitig eingeschaltet werden, dies ist bei einer Lüftungsanlage technisch jedoch nicht möglich da der erhöhte Anlaufstrom mehrerer Ventilatoren die vorgelagerten elektrischen Komponenten (Trafos, Leistungsschalter) überlasten würden. Zum Schutz dieser Anlagen können die Ventilatoren nur gestaffelt (meist im Abstand von 10 Sekunden) hochgefahren werden. Wichtig ist jedoch, dass die im späteren realen Ereignisbetrieb kürzestmögliche Staffelung beim Hochfahren erreicht wird und keine zusätzlichen Verzögerungen (wie zum Beispiel Drehrichtungsumkehr oder Mindestlaufzeiten) beim Aufzeichnen der Sprungantworten auftreten.

Nachdem die Strahlventilatoren aktiviert sind muss solange gewartet werden bis sich eine stationäre Endgeschwindigkeit im Tunnel einstellt. Für eine leichtere und genauere spätere Auswertung sollte dieser Zustand für einige Minuten beibehalten werden, bevor die Lüftung wieder deaktiviert wird.

Dieser Vorgang sollte für die entgegengesetzte Strömungsrichtung (mit der selben Anzahl an Strahlventilatoren) wiederholt werden, um die Sprungantworten in beide Richtungen aufzeichnen zu können. Der Grund hierfür liegt einerseits darin, dass in den meisten Fällen keine neutralen Startbedingungen (Anfangsgeschwindigkeit  $\approx 0$  m/s) vorliegen werden, die erzielbare Endgeschwindigkeit allerdings von der Anfangsgeschwindigkeit abhängt. Andererseits ist auch bei vollständig reversiblen Strahlventilatoren der Schub nicht in beide Richtungen gleich hoch.

Abbildung 4-1 zeigt die auf diese Weise aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufe für die RFB Linz des Tunnels Neumarkt. Blau stellt dabei den Verlauf der Längsgeschwindigkeit im Tunnel bei schnellstmöglicher Staffelung der Ventilatoren in Fahrtrichtung dar, orange den Verlauf bei Staffelung entgegen der Fahrtrichtung.

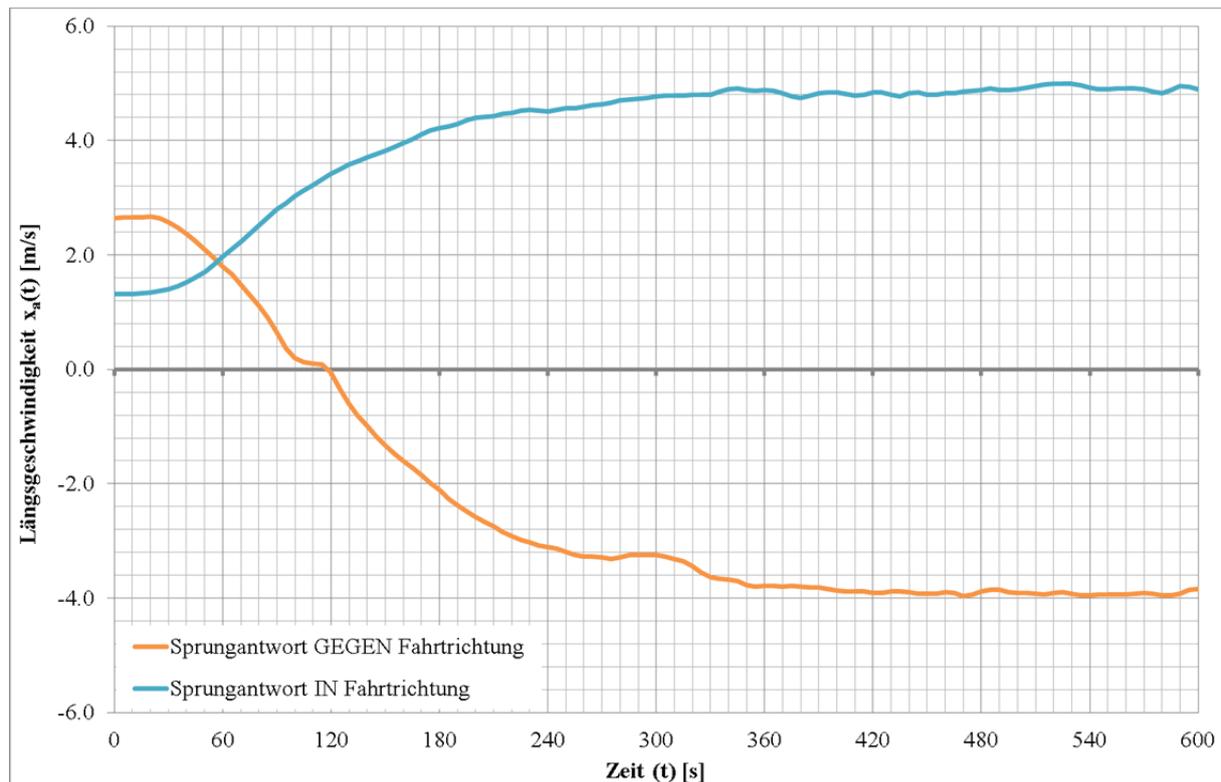


Abbildung 4-1: aufgezeichnete Verläufe der Sprungantworten (Tunnel Neumarkt)

Aus den dargestellten Verläufen wird ersichtlich, warum die Sprungantworten immer in beide Richtungen ausgewertet werden sollte. In Fahrtrichtung wird nur eine stationäre Endgeschwindigkeit von ca. +4,9 m/s erreicht obwohl vor dem Test bereits eine Geschwindigkeit von über +1,3 m/s vorlag (erzieltes  $\Delta v \approx 3,6$  m/s). Entgegen der Fahrtrichtung hingegen stellt sich eine stationäre Endgeschwindigkeit von ca. -3,9 m/s ein, obwohl die Längsgeschwindigkeit anfangs bei über +2,6 m/s lag (erzieltes  $\Delta v \approx 6,5$  m/s).

Zudem kann aus den beiden aufgezeichneten Verläufen bereits auf das Grundlegende Verhalten der Regelstrecke (und somit auf das gesuchte Übertragungselement) geschlossen werden:

- Der Sprungantwortverläufe  $x_a$  geht für  $t \rightarrow \infty$  auf einen neuen stationären Wert über
- Der Verlauf der Sprungantworten weist kein Überschwingen auf
- Der Sprungantwortverlauf verfügt jeweils über einen Wendepunkt

Aus dem Verhalten der Sprungantwort  $x_a$  für  $t \rightarrow \infty$  wird ersichtlich dass sich die gesuchte Übertragungsfunktion proportional verhält, man spricht in einem solchen Fall auch von einem Übertragungselement mit Ausgleich.

Der Wendepunkt gilt zudem als klassisches Merkmal einer Regelstrecke mit mehreren Verzögerungselementen.

Da die aufgezeichneten Sprungantwortverläufe kein Überschwingen und einen Wendepunkt aufweisen kann das grafische Wendetangentenverfahren angewendet werden [Lutz & Wendt, 2014].

### 4.3.2 Anwendung des Wendetangentenverfahrens

Am Beispiel der beiden in der RFB Linz des Tunnels Neumarkt aufgezeichneten Sprungantworten (IN und GEGEN die Fahrtrichtung) soll das grafische Wendetangentenverfahren gezeigt und durchgeführt werden.

Das Wendetangentenverfahren [Lutz & Wendt, 2014] dient dazu aus experimentell ermittelten Verläufen von Sprungantworten die sogenannten Zeitkennwerte  $T_u$  (Verzugszeit oder Ersatztotzeit) und  $T_g$  (Ausgleichszeit) ermitteln zu können. Mit Hilfe dieser Kennwerte können dann in weiterer Folge die Zeitkonstanten der eigentlichen Übertragungsfunktion der Regelstrecke berechnet werden.

In einem ersten Schritt werden die beiden Geschwindigkeitsverläufe aus Abbildung 4-1 ‚normiert‘ indem sie entlang der y-Achse derart geschiftet wurden, dass bei  $t=0$  auch die Längsgeschwindigkeit  $x_a = 0$  beträgt. Dies erleichtert das Ablesen der erforderlichen Werte und vereinfacht die Auswertung.

Als zweites wird im Wendepunkt der Sprungantwort die Tangente an den aufgezeichneten Verlauf gelegt. Mit Hilfe des Schnittpunkts der Wendetangente mit der Abszisse ( $x_a = 0$ ) kann die Verzugszeit (oder auch Ersatztotzeit)  $T_u$  direkt aus dem Diagramm abgelesen werden.

Verlängert man den stationären Endwert  $x_a$  bei  $t \rightarrow \infty$  in Richtung Ordinate und bringt diese Linie ebenfalls mit der Wendetangente zum Schnitt so kann die Summe aus Verzugszeit  $T_u$  und Ausgleichszeit  $T_g$  abgelesen werden. Da  $T_u$  ja bereits bekannt ist kann daraus auch  $T_g$  direkt ermittelt werden.

Abbildung 4-2 zeigt die Anwendung und das Ergebnis des Wendetangentenverfahrens für die Sprungantwort der RFB Linz des Tunnels Neumarkt IN Fahrtrichtung, Abbildung 4-3 für die Sprungantwort GEGEN Fahrtrichtung.

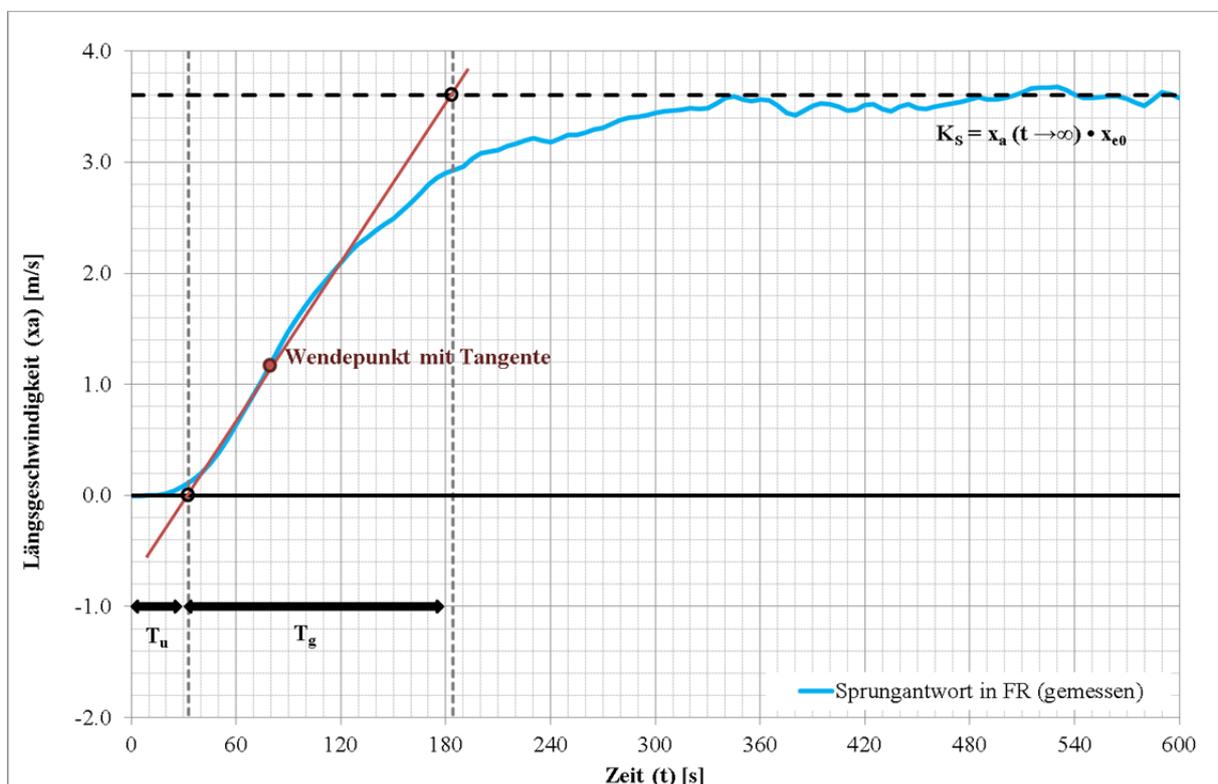


Abbildung 4-2: Wendetangentenverfahren bei Sprungantwort IN Fahrtrichtung

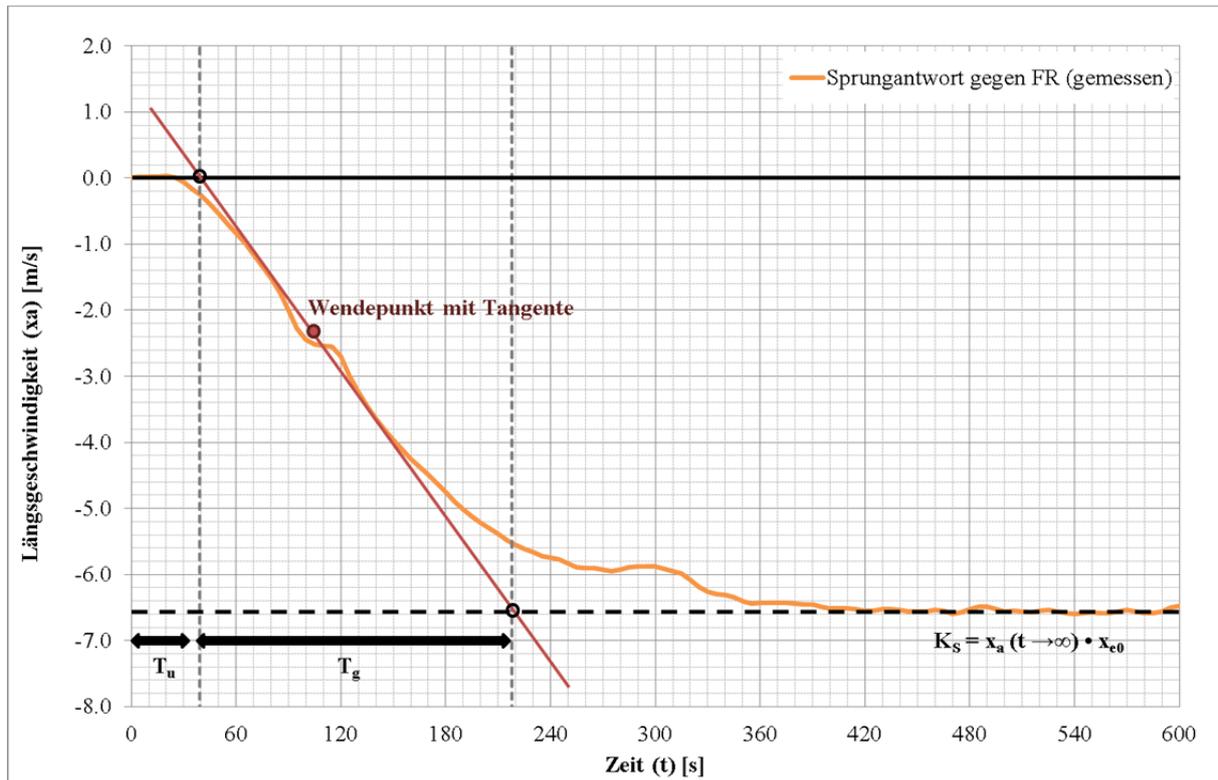


Abbildung 4-3: Wendetangentenverfahren bei Sprungantwort GEGEN Fahrtrichtung

Zusätzlich kann aus den Sprungantworten auch noch die Proportionalverstärkung  $K_S$  des gesuchten Übertragungselements ermittelt werden. Dazu wird einfach die Differenz der stationäre Werte von  $x_a$  bei  $t \rightarrow \infty$  und  $t = 0$  gebildet. Ist zuvor eine ‚Normierung‘ der Sprungantwort erfolgt, ist der Term  $x_a(t=0) = 0$  und entfällt. Bezieht man diesen auf die zum Zeitpunkt  $t=0$  aufgeschaltete Sprunghöhe  $x_{e0}$  (Anzahl der insgesamt aktivierten Strahlventilatoren) erhält man die Proportionalverstärkung  $K_S$  [Lutz & Wendt, 2014]:

$$K_S = \frac{\text{Regelgrößenänderung}}{\text{Stellgrößenänderung}} = \frac{x_a(t \rightarrow \infty) - x_a(t = 0)}{x_{e0}} \quad (4-1)$$

Das Wendetangentenverfahren liefert somit insgesamt drei wichtige Kenngrößen ( $K_S$ ,  $T_u$  und  $T_g$ ) und kann für Regelstrecken mit 2 Zeitkonstanten ( $T_1 \neq T_2$ ), mit mehreren gleichen Zeitkonstanten ( $T_1$ ) oder mit 2 gleichen und einer dritten Zeitkonstante ( $T_1, T_2 = T_3$ ) angewendet werden.

Für die beiden aufgezeichneten Sprungantworten in der RFB Linz des Tunnels Neumarkt ergeben sich auf Basis des beschriebenen Wendetangentenverfahrens und der angeführten Beziehungen folgende Kennwerte:

Tabelle 4-1: Kenngrößen aus dem Wendetangentenverfahren, Tunnel Neumarkt – RFB Linz

Sprungantwort	$x_a(t \rightarrow \infty)$	$x_{e0}$	$K_S$	$T_u$	$T_u + T_g$	$T_g$	$T_g / T_u$
	[m/s]	[#]	[-]	[s]	[s]	[s]	[-]
IN Fahrtrichtung	3,55	+7	0,5143	33	184	151	4,5758
GEGEN Fahrtrichtung	-6,55	-7	0,9357	39	218	179	4,5897

Die ermittelten Werte weisen, wie bereits vermutet, recht große Unterschiede in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung auf, was vor allem auf die während der Messungen vorherrschende, recht deutliche Grundströmung zurückzuführen ist.

Abbildung 4-4 zeigt die Vorgehensweise bzw. den Entscheidungsablauf zur experimentellen Streckenidentifikation mit Hilfe des Wendetangentenverfahrens in Form eines Flussdiagramms nach [Lutz & Wendt, 2014]:

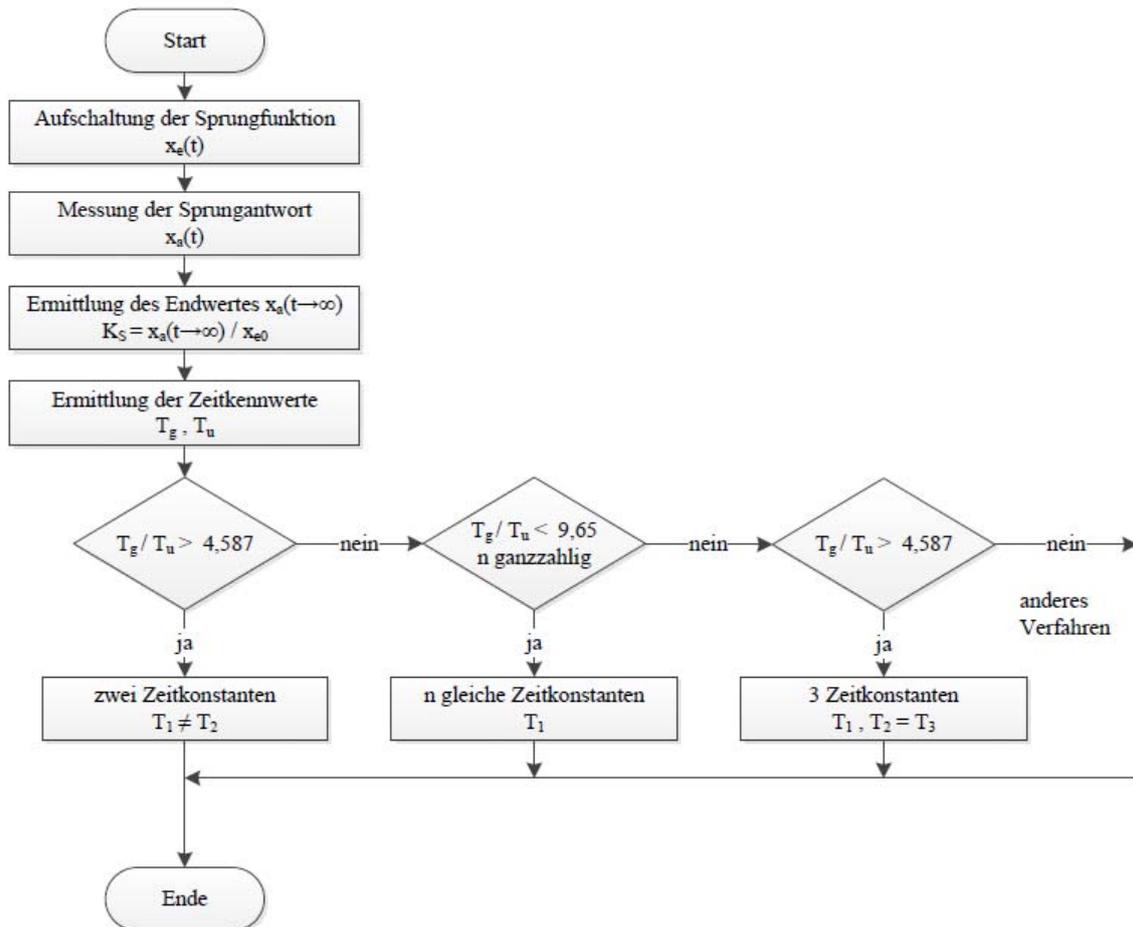


Abbildung 4-4: Vorgehensweise beim Wendetangentenverfahren, nach [Lutz & Wendt, 2014]

Wendet man diese Vorgehensweise auf die beiden betrachteten Sprungantwortverläufe an, so gilt in beiden Fällen dass das Verhältnis der beiden Kenngrößen  $T_g/T_u$  eindeutig kleiner dem vorgegebenen Grenzwert von 9,65 ist, ein Übertragungselement mit 2 voneinander unterschiedlichen Zeitkonstanten scheidet im vorliegenden Fall somit aus.

Nun muss noch bestimmt werden ob die Ordnung  $n$  für das jeweils ermittelte Verhältnis  $T_g/T_u$  ganzzahlig ist. Dazu vergleicht man die ermittelten Werte mit jenen aus Tabelle 4-2. Liegt der errechnete Quotient in der Nähe eines der tabellierten Werte, kann die Ordnung  $n$  des untersuchten Elements der Tabelle entnommen werden.

Liegt der Quotient zwischen zwei der tabellierten Werte, so sollte im Zweifelsfall zur Nachbildung der Regelstrecke immer das Modell höherer Ordnung herangezogen werden [Schneider, 2008].

Tabelle 4-2: Zeitverhältnisse für das Wendetangentenverfahren mit n gleichen Zeitkonstanten [Lutz & Wendt, 2014]

n	2	3	4	5	6	7	8
$T_u/T_g$	0,1036	0,2180	0,3194	0,4103	0,4933	0,5700	0,6417
$T_g/T_u$	9,6489	<b>4,5868</b>	3,1313	2,4372	2,0272	1,7543	1,5583
$T_g/T_1$	2,7183	3,6945	4,4635	5,1186	5,6991	6,2258	6,7113
$T_u/T_1$	0,2817	0,8055	1,4254	2,1002	2,8113	3,5489	4,3069

Für die untersuchten Sprungantworten trifft dies mit 4,5758 bzw. 4,5897 jedoch zu, beide Werte liegen ganz in der Nähe des tabellierten Wertes von 4,5868.

Auf Basis der mit Hilfe des Wendetangentenverfahrens ermittelten Kenngrößen Verzugszeit  $T_u$  und Ausgleichszeit  $T_g$  kann aus den zur festgestellten Ordnung n tabellierten Werten für die Quotienten  $T_g/T_1$  bzw.  $T_u/T_1$  problemlos die zugehörige Zeitkonstante  $T_1$  errechnet werden.

Bei dem gesuchten Übertragungselement handelt es sich somit mit sehr guter Näherung um ein Proportionalelement mit n gleichen Zeitkonstanten ( $PT_n$ -Element), wobei die Ordnung n als 3 identifiziert werden konnte.

#### 4.3.3 Alternative für $PT_n$ -Übertragungsfunktionen: die Zeitprozentkennwertmethode

Kapitel 4.3.2 hat prinzipiell gezeigt, dass das Wendetangentenverfahren recht einfach anzuwenden ist und schnell die benötigten Ergebnisse für eine Identifikation des gesuchten Übertragungselements liefert.

Ein erheblicher Nachteil dieses grafischen Verfahrens liegt jedoch darin, dass beim Ermitteln des Wendepunkts bzw. der erforderlichen Wendetangente merkbare Fehler gemacht werden können. Da die Sprungantworten experimentell ermittelt werden können Messfehler und Ungenauigkeiten dazu führen, dass die Ermittlung der Schnittpunkte mit den Achsen nicht eindeutig ist, was das Ablesen der benötigten Kenngrößen erschwert bzw. fehlerhaft machen kann.

Die bisherigen Auswertungen der beiden Sprungantworten des Tunnels Neumarkt haben gezeigt, dass diese sich mit sehr guter Näherung als  $PT_n$ -Element mit n gleichen Zeitkonstanten annähern lassen. Für solche Übertragungsfunktionen gibt es eine weniger fehleranfällige Alternative zum Wendetangentenverfahren.

Die Zeitprozentkennwertmethode nach SCHWARZE [Lutz & Wendt, 2014] vermeidet diese Nachteile indem so genannte Zeitprozentwerte direkt aus den experimentell erfassten Verläufen bestimmt werden, wobei das Ermitteln/Ablesen dieser Werte keine weiteren Fehler in sich birgt.

Die ersten Schritte dieses Verfahrens sind gleich wie beim Wendetangentenverfahren. Auf die untersuchte Regelstrecke wird eine Sprungfunktion (Zuschalten einer definierten Anzahl an Strahlventilatoren mit kürzestmöglicher Staffelung) aufgebracht und die Sprungantwort als Funktion der Zeit gleichzeitig aufgezeichnet. Anschließend wird die Sprungantwort wieder ‚normiert‘ so dass zum Zeitpunkt  $t = 0$  die stationäre Startgeschwindigkeit  $v = 0$  beträgt.

Anschließend kann der Proportionalbeiwert  $K_S$  wie bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben gemäß Gleichung (4-1) aus der stationären Endgeschwindigkeit  $x_a$  bei  $t \rightarrow \infty$  und der Sprunghöhe  $x_{e0}$  bestimmt werden.

Als nächstes müssen die Ordnung des Elements  $n$  sowie die Ersatzzeitkonstante  $T_1$  bestimmt werden. Die Methode nach SCHWARZE [Lutz & Wendt, 2014] geht dabei von sogenannten Zeitprozentwerten  $t_m$  (mit  $m = 10, 50$  und  $90$ ) aus. Diese entsprechen jenen Zeiten (gerechnet ab dem Zeitpunkt der Aufschaltung der Sprungantwort,  $t = 0$ ) zu denen die Sprungantwort  $x_a$  jeweils 10, 50 oder 90% des stationären Endwerts  $x_a(t \rightarrow \infty)$  erreicht hat. Aus den beiden Zeitprozentwerten  $t_{10}$  und  $t_{90}$  wird der Quotient  $\mu$  gebildet:

$$\mu = \frac{t_{10}}{t_{90}} \quad (4-2)$$

Dieses Verhältnis wird anschließend mit den entsprechenden Werten für  $\mu_n$  in Tabelle 4-3 verglichen und jenes Verhältnis in der Tabelle bestimmt welches die kleinste Differenz zum Berechneten Quotienten aufweist. Aus der Tabelle können dann die Ordnung  $n$  sowie die zur Berechnung Zeitkonstante  $T_1$  erforderlichen Zeitprozentkennwerte  $\tau_{10}$ ,  $\tau_{50}$  und  $\tau_{90}$  abgelesen werden:

Tabelle 4-3: Zeitprozentkennwerte nach SCHWARZE [Lutz & Wendt, 2014]

Ordnung $n$	$\mu_n = \tau_{10} / \tau_{90}$	$\tau_{10}$	$\tau_{50}$	$\tau_{90}$
2	0,136722	0,531812	1,678347	3,889720
<b>3</b>	<b>0,207065</b>	<b>1,102065</b>	<b>2,674060</b>	<b>5,322320</b>
4	0,261162	1,744770	3,672061	6,680783
5	0,304318	2,432591	4,670909	7,993590
6	0,339839	3,151897	5,670161	9,274674
7	0,369801	3,894767	6,669637	10,532072
8	0,395561	4,656118	7,669249	11,770914

Der Quotient  $\mu$  sollte in der Nähe eines der tabellierten Werte liegen. Ist dies nicht der Fall, sollte auf jeden Fall gemäß dem Schema in Abbildung 4-4 nochmals geprüft werden, ob nicht eine Annäherung durch eines der beiden anderen Verfahren (2 bzw. 3 nicht gleiche Zeitkonstanten) zu einem exakteren Ergebnis führen würde. Im Zweifelsfall sollte immer die höhere Ordnung gewählt werden [Schneider, 2008].

Die Zeitkonstante  $T_1$  des gesuchten Übertragungselements wird gemittelt gemäß der Beziehung [Lutz & Wendt, 2014]

$$T_1 = \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{t_{10}}{\tau_{10}} + \frac{t_{50}}{\tau_{50}} + \frac{t_{90}}{\tau_{90}} \right] \quad (4-3)$$

Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 zeigen das Zeitprozentkennwertverfahren angewendet auf die beiden bereits bekannten Sprungantworten der RFB Linz des Tunnels Neumarkt. Die Bestimmung der stationären Verstärkung bzw. des Proportionalbeiwerts  $K_S$  erfolgt analog zum Wendetangentenverfahren aus der stationären Endgeschwindigkeit  $x_a(t \rightarrow \infty)$  und der Sprunghöhe  $x_{e0}$ .

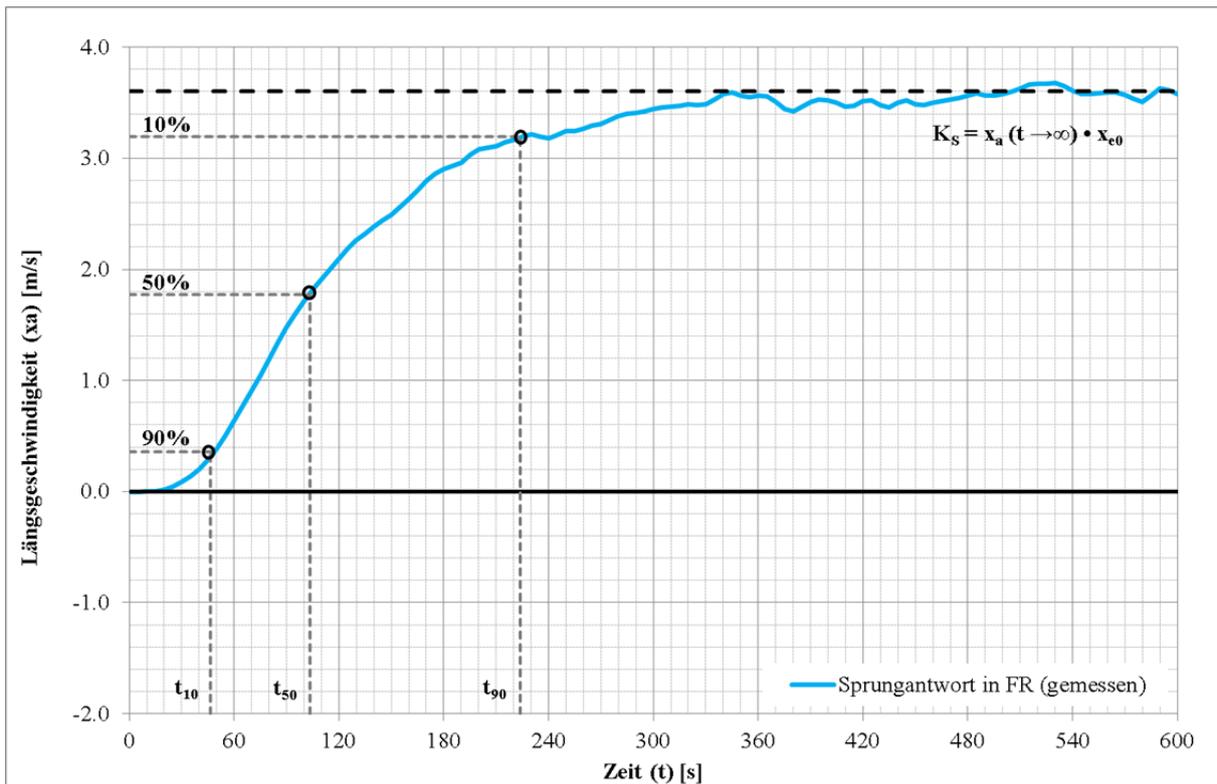


Abbildung 4-5: Zeitprozentkennwertmethode bei Sprungantwort IN Fahrtrichtung

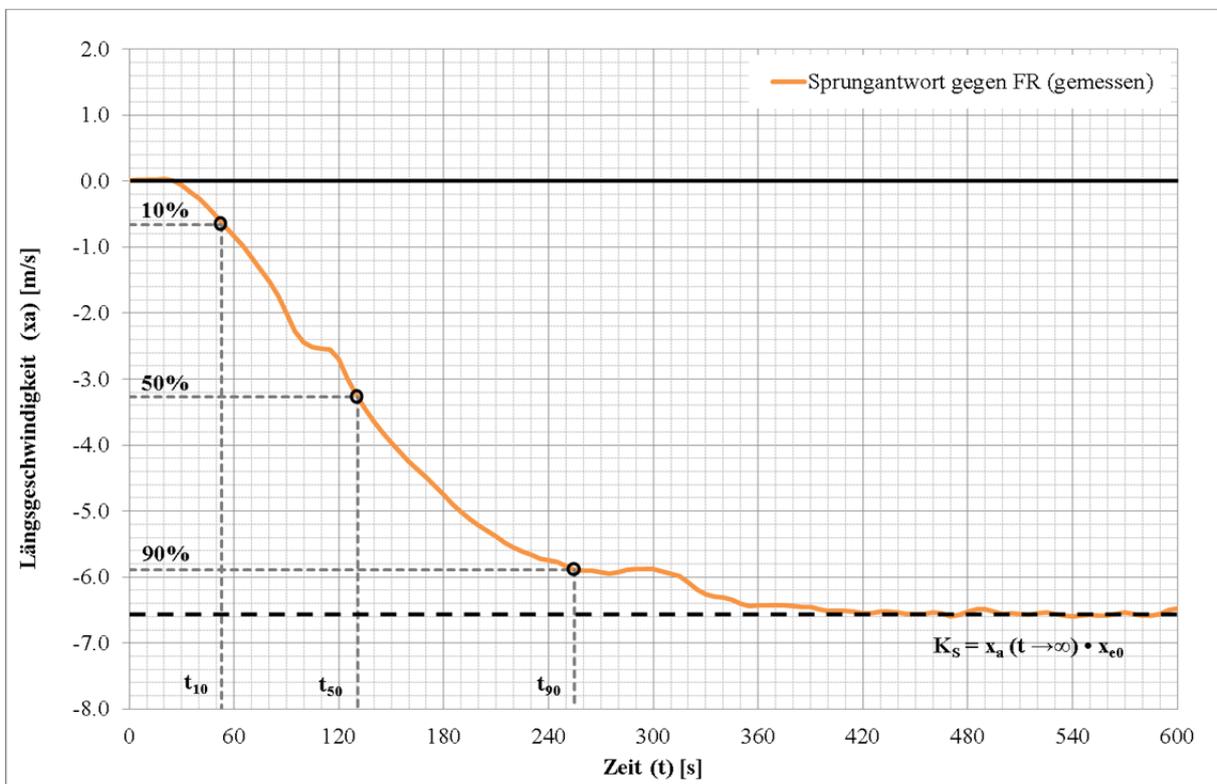


Abbildung 4-6: Zeitprozentkennwertmethode bei Sprungantwort GEGEN Fahrtrichtung

Das Zeitprozentwertverfahren liefert für die beiden Sprungantworten (IN und GEGEN die Fahrtrichtung) folgenden Kennwerte:

Tabelle 4-4: Kenngrößen aus der Zeitprozentkennwertmethode, Tunnel Neumarkt – RFB Linz

Sprungantwort	$K_S$	$x_a(10\%)$	$t_{10}$	$x_a(50\%)$	$t_{50}$	$x_a(90\%)$	$t_{90}$	$\mu = t_{10}/t_{90}$
	[-]	[m/s]	[s]	[m/s]	[s]	[m/s]	[s]	[-]
IN Fahrtrichtung	<b>0,5143</b>	0,355	<b>46,5</b>	1,775	<b>103,5</b>	3,195	<b>224,0</b>	<b>0,2076</b>
GEGEN Fahrtrichtung	<b>0,9357</b>	-0,655	<b>53,0</b>	-3,275	<b>131,0</b>	-5,895	<b>255,0</b>	<b>0,2078</b>

Das errechnete Verhältnis  $\mu$  liegt mit 0,2076 bzw. 0,2078 in beiden Fällen in unmittelbarer Nähe des Wertes  $\mu_n$  von 0,207065 aus Tabelle 4-3. Somit erhalten wir aus den zugehörigen tabellierten Werten die Ordnung  $n = 3$  sowie die zugehörigen Zeitprozentkennwerte  $\tau_{10}$ ,  $\tau_{50}$  und  $\tau_{90}$ . Daraus kann mit Hilfe der Mittelungsgleichung (4-3) die Ersatzzeitkonstante  $T_1$  errechnet werden.

Für einige weitere Schritte werden jedoch explizit die Kenngrößen  $T_u$  (Verzugs- oder Ersatztotzeit) und  $T_g$  (Ausgleichszeit) benötigt. Auf Basis der Zeitverhältnisse für  $PT_n$ -Übertragungsverhalten, welche bereits aus dem Wendetangentenverfahren bekannt sind (Tabelle 4-2), kann mit Hilfe der Ersatzzeitkonstante  $T_1$  wiederum auf die beiden benötigten Kenngrößen Verzugs- und Ausgleichszeit ( $T_u$  und  $T_g$ ) rückgerechnet werden.

#### 4.3.4 Zusammenfassung / Vergleich der Übertragungsfunktionen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das grafische Wendetangentenverfahren und ergänzend dazu die rein rechnerische Zeitprozentkennwertmethode beispielhaft an der RFB Linz des Tunnels Neumarkt angewendet.

Beide Verfahren liefern schnell und einfach die wichtigsten Kenngrößen, die benötigt werden um eine Übertragungsfunktion bestimmen zu können, durch die das Übertragungsverhalten der realen Regelstrecke (Tunnel) mathematisch angenähert werden kann.

Für beide Verfahren werden experimentell erfasste Verläufe von Sprungantworten des Realsystems benötigt. Das rein grafische Wendetangentenverfahren [Lutz & Wendt, 2014] birgt jedoch einige Ungenauigkeiten im Bereich der Wendetangentenkonstruktion und beim Ermitteln der Schnittpunkte bzw. in weiterer Folge beim Ablesen der Kenngrößen in sich. Diese Ungenauigkeiten können bei Anwendung der Zeitprozentkennwertmethode nach SCHWARZE [Lutz & Wendt, 2014] größtenteils vermieden werden.

Bei sauberen Sprungantwortverläufen und mit entsprechender Sorgfalt liefern beide Methoden recht genaue Ergebnisse. Auf Grund der etwas höheren Genauigkeit werden in weiterer Folge jedoch nur mehr die Werte aus dem Zeitprozentkennwertverfahren weiterverwendet. In Tabelle 4-5 sind die aus den Sprungantworten gewonnenen Kenngrößen  $K_S$ ,  $T_u$ ,  $T_g$  und  $T_1$  für beide Strömungsrichtungen (IN und GEGEN die Fahrtrichtung) für die RFB Linz des Tunnels Neumarkt zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen, Tunnel Neumarkt – RFB Linz

Kenngrößen (aus Sprunganworten) Neumarkt, RFB Linz	$K_S$	$T_u$	$T_g$	$T_g/T_u$	$T_1$
	[-]	[s]	[s]	[-]	[s]
IN Fahrtrichtung	0,5143	33,0	151,5	4,6	40,995
GEGEN Fahrtrichtung	0,9357	38,9	178,6	4,6	48,330

Es gibt zwei gängige Ansätze um die untersuchte Regelstrecke auf Basis der ermittelten Kenngrößen durch eine entsprechende Übertragungsfunktion ersetzen zu können.

Der erste geht davon aus, dass die Regelstrecke durch ein Totzeitelement  $T_t$  und ein Verzögerungselement 1. Ordnung ( $PT_1$ ) angenähert werden kann. Bei vielen Transportvorgängen (Materie oder Energie) und in der Verfahrenstechnik findet diese Methode Anwendung [Lutz & Wendt, 2014]. Die Übertragungsfunktion lautet in diesem Fall:

$$G_{S(s)} = K_S \cdot \frac{e^{-T_t \cdot s}}{1 + s \cdot T_S} \quad (4-4)$$

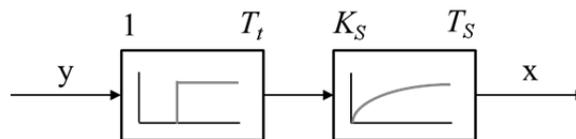


Abbildung 4-7: Strukturbild eines  $PT_1$ - $T_t$ -Übertragungselements

Mit Hilfe des Wendetangentenverfahrens wurden ja bereits die sogenannte Verzugs- oder Ersatztotzeit  $T_u$  und die Ausgleichszeit  $T_g$  sowie die statische Verstärkung  $K_S$  bestimmt. Übernimmt man nun diese Werte und setzt in der Übertragungsfunktion  $G_{S(s)}$  (4-4) die Totzeit  $T_t$  gleich der Verzugszeit  $T_u$  und die Zeitkonstante  $T_S$  des Verzögerungsglieds gleich der Ausgleichszeit  $T_g$  so kann die zu identifizierende Regelstrecke entsprechend durch das resultierende  $PT_1$ - $T_t$ -Element angenähert werden.

Der zweite Ansatz geht von einer Annäherung der Regelstrecke durch ein  $PT_n$ -Element aus (Serienschaltung von  $n$  Verzögerungselementen mit gleicher Zeitkonstante  $T_S$ ). Dies ist insbesondere bei S-förmigen Sprunganworten mit Wendepunkt und ohne Überschwingen eine gern gewählte Methode zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens. Die Übertragungsfunktion für diesen Fall lautet wie folgt:

$$G_{S(s)} = \frac{K_S}{(1 + T_S \cdot s)^n} \quad (4-5)$$

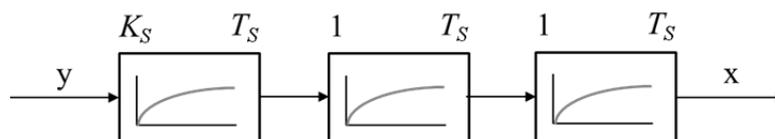


Abbildung 4-8: Strukturbild eines  $PT_n$ -Übertragungselements

Die statische Verstärkung  $K_S$  ist bereits bekannt, die Ordnung  $n$  sowie die Zeitkonstante  $T_S$  können ebenfalls direkt aus den ermittelten Kenngrößen übernommen werden.

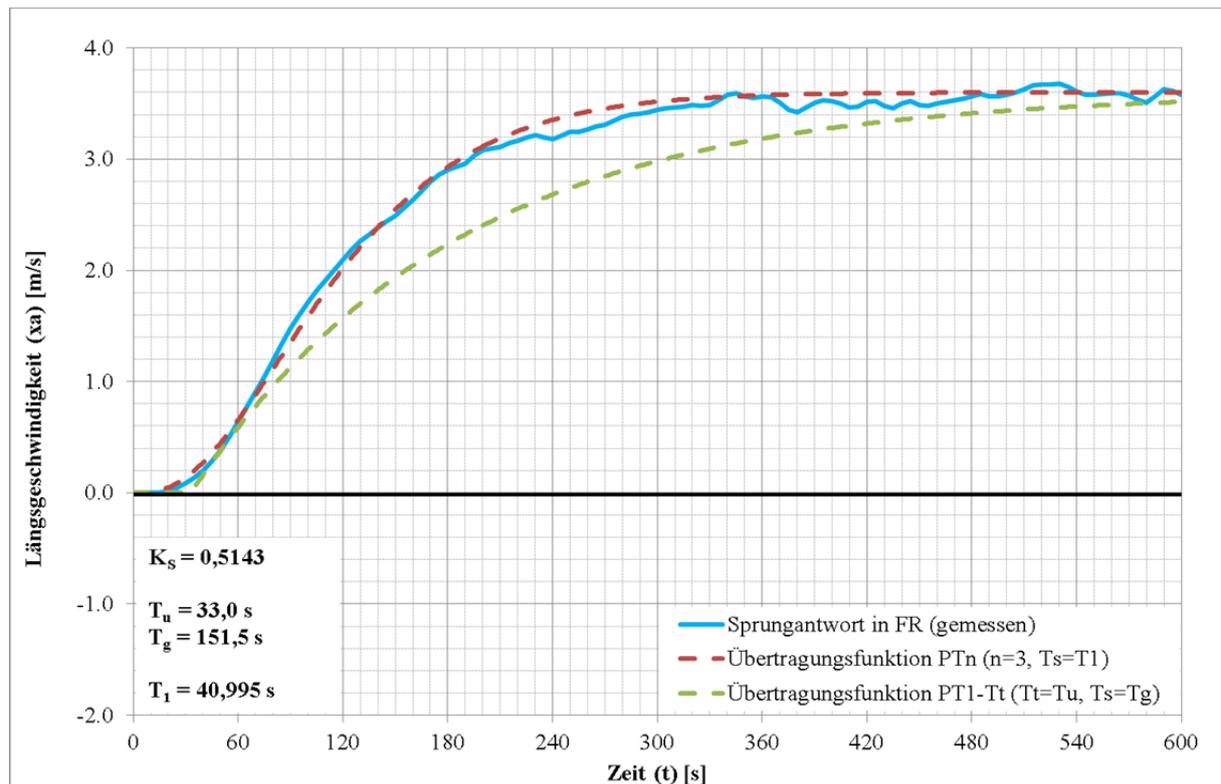


Abbildung 4-9: Sprungantwort IN Fahrtrichtung / Ersatzübertragungsfunktionen

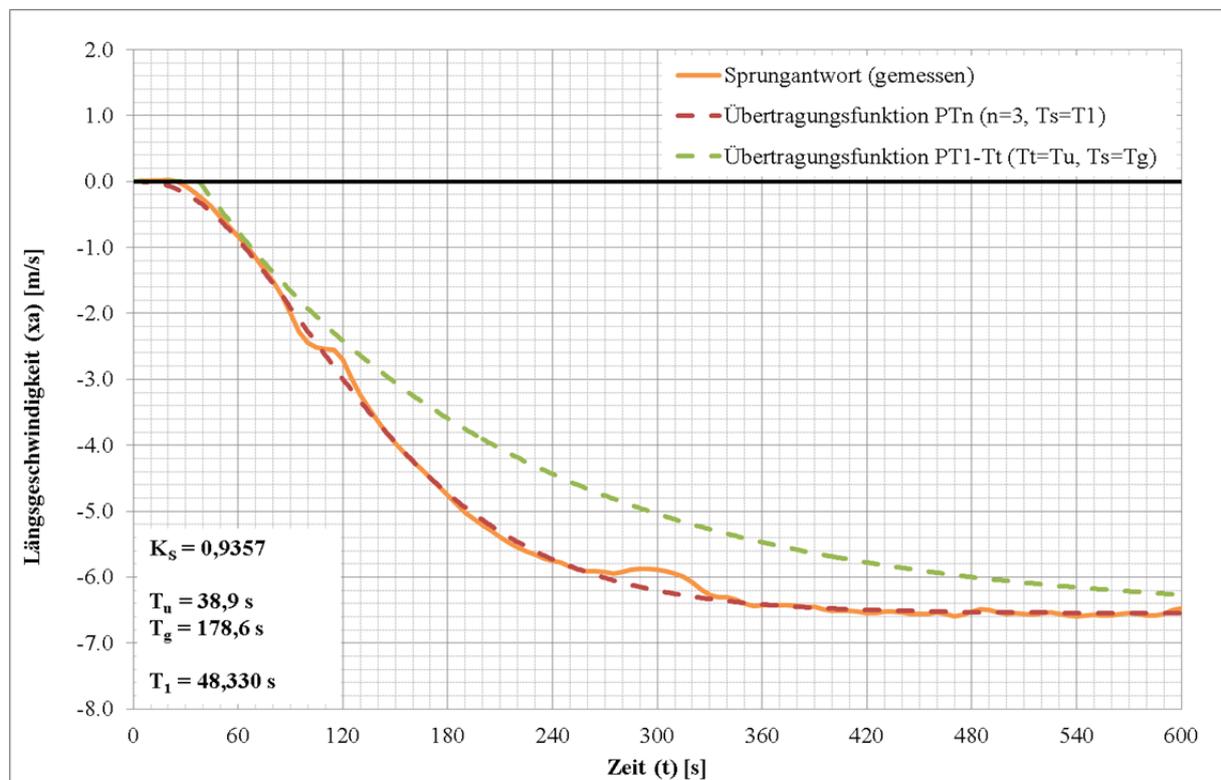


Abbildung 4-10: Sprungantwort GEGEN Fahrtrichtung / Ersatzübertragungsfunktionen

Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 zeigen jeweils eine Gegenüberstellung der gemessenen Sprungantwort (IN und GEGEN die Fahrtrichtung) mit den in MATLAB Simulink simulierten Sprungantworten der beiden angenäherten Übertragungsfunktionen ( $PT_1-T_t$  und  $PT_n$ ). Die verwendeten Parameter (Kenngrößen) für die Simulationen sind ebenfalls im jeweiligen Diagramm dargestellt.

In beiden Fällen zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Die Annäherung durch Ersatzzeit und Verzögerung 1. Ordnung ( $PT_1-T_t$ ) bildet die Sprungantwort in den ersten 60-80 Sekunden recht gut ab, danach weicht die Simulation jedoch zusehends von der Messung ab. Erst langsam nähern sich die beiden Kurven wieder einander an, jedoch ist bei der gewählten Übertragungsfunktion selbst nach 600 Sekunden der stationäre Endwert noch nicht ganz erreicht.

Die Annäherung durch ein Verzögerungselement mit  $n$  gleichen Zeitkonstanten ( $PT_n$ ), im vorliegenden Fall mit der Ordnung  $n = 3$ , zeigt hingegen über den gesamten Bereich von  $t = 0$  bis zum Erreichen der stationären Endgeschwindigkeit eine hervorragende Übereinstimmung.

Für die Anwendung der bislang diskutierten Verfahren auf Tunnellüftungsanlagen kann somit klar festgestellt werden, dass die Regelstrecke durch ein  $PT_n$ -Glied mit  $n$  gleichen Zeitkonstanten sehr gut angenähert werden kann. Die dafür erforderlichen Kenngrößen (statische Verstärkung / Proportionalbeiwert, und Ersatzzeitkonstante) können sowohl mit dem grafischen Wendetangentenverfahren als auch mit der rein rechnerischen Zeitprozentkennwertmethode relativ einfach aus der Aufzeichnung der Sprungantworten erfolgen. Auf Grund der höheren Genauigkeit sollte nach Möglichkeit dem Zeitprozentkennwertverfahren nach SCHWARZE der Vorzug gegeben werden. Da die Sprungantwort in einem Tunnel recht stark von den Startbedingungen (natürliche Strömung) abhängt, sollte eine Aufzeichnung immer für beide Strömungsrichtungen durchgeführt werden.

## 4.4 Ausführung des Reglers / steuerungstechnische Maßnahmen

### 4.4.1 Beurteilung der Regelbarkeit der Strecke

In Kapitel 4.3 wurden für die aufgezeichneten Sprungantworten des Tunnels Neumarkt (RFB Linz) bereits mit Hilfe des Wendetangenten- bzw. Zeitprozentkennwertverfahrens die wesentlichen Kenngrößen zur Identifikation der Regelstrecke ermittelt.

Einerseits gilt: je größer die Verzugszeit  $T_u$  desto schlechter die Regelbarkeit und desto höher der Schwierigkeitsgrad. Der Grund hierfür liegt darin, dass in dieser Zeit die veränderte Stellgröße bereits voll auf die Regelstrecke wirkt, sich jedoch die zu regelnde Größe gleichzeitig noch kaum spürbar ändert - der Regler kann daher nicht entsprechend reagieren [Christen, 2010].

Andererseits sinkt die Regelbarkeit auch mit kürzer werdender Ausgleichszeit  $T_g$ . Nach Ablauf der Verzugszeit ändert sich die Regelgröße so schnell, dass der Regler kaum nachkommt um entsprechend gegenzuregeln [Christen, 2010].

Insgesamt ist somit weniger der Absolutwert der beiden Größen für die Regelbarkeit einer Strecke entscheidend, sondern vielmehr deren Verhältnis zueinander. Verfügt eine Regelstrecke über eine große Verzugszeit  $T_u$  und gleichzeitig eine kleine Ausgleichszeit  $T_g$ , so liegt eine insgesamt schlechte Regelbarkeit vor. Umgekehrt bedeutet eine kurze Verzugszeit  $T_u$  bei gleichzeitig langer Ausgleichszeit  $T_g$  in Summe eine gute Regelbarkeit der betroffenen Strecke [Christen, 2010].

Auf Basis des Quotienten von Ausgleichszeit  $T_g$  zu Verzugszeit  $T_u$  kann also auf die Regelbarkeit (bzw. den Schwierigkeitsgrad) einer zu untersuchenden Strecke geschlossen werden. Tabelle 4-6 zeigt zusammenfassend eine Einstufung der Regelbarkeit einer Strecke in Abhängigkeit dieses Verhältnisses:

Tabelle 4-6: Regelbarkeit einer Strecke, [Christen, 2010]

Regelbarkeit der Strecke in Abhängigkeit des Quotienten $T_g/T_u$	
$T_g/T_u > 10$	sehr gut regelbar
$10 > T_g/T_u > 5$	gut regelbar
$5 > T_g/T_u > 3$	mäßig regelbar
$3 > T_g/T_u > 2$	schlecht regelbar
$T_g/T_u < 2$	nicht regelbar

Übertragen auf die Regelbarkeit von  $PT_n$ -Elementen mit  $n$  gleichen Zeitkonstanten bedeutet dies folgendes: Ein Verzögerungselement 1. Ordnung ( $PT_1$ -Element) besitzt keine Verzugszeit ( $T_u = 0$ ), der Quotient  $T_g/T_u$  geht somit gegen unendlich. Ein solches Element lässt sich theoretisch perfekt regeln. Mit zunehmender Ordnung  $n$  einer Regelstrecke (also je mehr Verzögerungselemente die Strecke enthält) desto kleiner wird das Verhältnis von  $T_g/T_u$  – die Regelbarkeit nimmt also mit zunehmender Ordnung der Strecke ab, der Aufwand für die Regelung entsprechend zu.

Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 4-11 dargestellt.

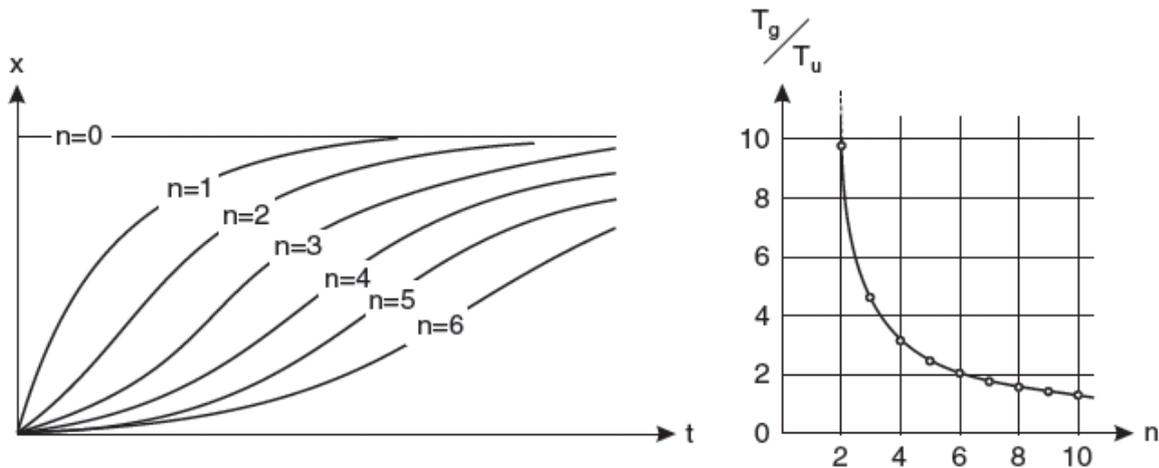


Abbildung 4-11: Sprungantworten Regelstrecken höherer Ordnung mit  $n$  gleichen Zeitkonstanten (links) sowie daraus resultierende Quotienten  $T_g/T_u$  (rechts), [Christen, 2010]

Die beiden bislang untersuchten Sprungantworten (IN und GEGEN die Fahrtrichtung) des Tunnels Neumarkts (das Verhältnis  $T_g/T_u$  liegt in beiden Fällen bei ca. 4,6, die Ordnung  $n$  der identifizierten Ersatzübertragungsfunktionen beträgt in beiden Fällen 3) deutet somit auf eine ‚mäßig‘ bis ‚gute‘ Regelbarkeit der untersuchten Strecke hin.

Die Regelbarkeit der Strecke bestimmt in weiterer Folge die Wahl des Reglertyps.

#### 4.4.2 Auswahl eines geeigneten Reglers

Bei einer Regelstrecke mit Ausgleich höherer Ordnung (Übertragungsfunktion entspricht einem  $PT_n$ -Element) kann zur Wahl des geeigneten Reglertyps ebenfalls das Verhältnis von Ausgleichszeit  $T_g$  zu Verzugszeit  $T_u$  herangezogen werden. In der Literatur findet man diesbezüglich zum Teil etwas unterschiedliche empfohlene Verhältnissbereiche je Reglertyp. Tabelle 4-7 zeigt einen etwas angepassten, auf [Christen, 2010] basierenden Vorschlag zur Wahl eines geeigneten Reglertypen:

Tabelle 4-7: Auswahl Reglertyp anhand des Quotienten  $T_g/T_u$ , modif. nach [Christen, 2010]

Verhältnis $T_g/T_u$	Wahl des Reglers (Vorschlag)
$T_g/T_u > 10$	P-Regler
$10 > T_g/T_u > 5$	PI-Regler
$5 > T_g/T_u > 3$	PID-Regler
$T_g/T_u < 3$	Regelkaskade

Für schlecht regelbare System ( $T_g/T_u < 3$ ) sollte eine Regelkaskade umgesetzt werden. Für mäßig regelbare Systeme ( $5 > T_g/T_u > 3$ ) wird ein PID-Regler vorgeschlagen, für gut regelbare Systeme ( $10 > T_g/T_u > 5$ ) ein PI-Regler. Für sehr gut regelbare System ( $T_g/T_u > 10$ ) genügen üblicherweise reine P-Regler.

Die bislang untersuchte Regelstrecke des Tunnels Neumarkt (RFB Linz) liegt mit einem Verhältnis von  $T_g/T_u$  von 4,6 somit im Grenzbereich zwischen PI- und PID-Regler.

Regler mit D-Anteil zählen zu den schnellsten klassischen Reglertypen. Der D-Anteil kommt deswegen in der Regel dort zum Einsatz, wo hohe Dynamik gewünscht wird bzw. erforderlich ist. Um diese Schnelligkeit jedoch voll ausnutzen zu können darf keine Limitierung der Aktuatoren (Stellgröße) vorliegen [RN-Wissen, 2014].

Bei Tunnellüftungsanlagen ist die Stellgröße immer in mehrerer Hinsicht begrenzt: Es steht nur eine begrenzte Anzahl an Strahlventilatoren (Aktuatoren) zur Verfügung. Zusätzlich können netzbetriebene Strahlventilatoren (EIN/AUS ohne Drehzahlregelung) nicht beliebig schnell zu- und weggeschaltet werden, da immer eine Staffelung zum Schutz der vorgelagerten elektrischen Systeme erforderlich ist. Zudem besteht die Gefahr dass bei zu schneller Drehrichtungsumkehr (z.B. beim Wechsel von Beschleunigungs- auf Bremsbetrieb) bzw. bei zu hohen Schaltfrequenzen (häufiges Ein- und Ausschalten innerhalb kurzer Zeit) ein zu hoher Anlaufstrom dazu führt dass die zugehörigen Leistungsschalter fallen. Ventilatoren deren Leistungsschalter gefallen sind stehen dem System solange nicht mehr zur Verfügung bis der Schalter direkt vor Ort in der Betriebszentrale durch einen Techniker wieder eingesichert wird.

Die erzielbare Dynamik ist daher technisch bedingt, so wie auch der daraus resultierende Vorteil des PID-Reglers gegenüber einem PI-Regler, begrenzt.

Zudem verfügt ein PI-Regler lediglich über 2 Parameter die eingestellt und angepasst werden müssen, während ein PID-Regler noch einen dritten Parameter (Vorhaltezeit  $T_V$ ) ins System mitbringt. Die 3 Parameter  $K_P$ ,  $T_n$  und  $T_V$  bieten bei Festlegung des gewünschten Regelverlaufs zwar nahezu uneingeschränkte Möglichkeiten, es muss jedoch umso mehr auf eine sorgfältige, und vor allem genau auf die Regelstrecke abgestimmte Auslegung und Optimierung geachtet werden.

Da der PID-Regler bei Tunnellüftungsanlagen, auf Grund der oben beschriebenen Randbedingungen, kaum Vorteile bringt, die Inbetriebnahme und Optimierung dadurch jedoch erheblich komplexer wird, soll im gegenständlich untersuchten Tunnel Neumarkt (RFB Linz) ein PI-Regler zur umgesetzt werden.

Aufbau und Ausführung des ausgeführten PI-Reglers können dem folgenden Kapitel entnommen werden.

#### 4.4.3 Ausführung des gewählten Reglers

Zur Ausführung gelangt ein PI-Regler. Dieser kommt in der Praxis sehr häufig zum Einsatz da er ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Parametrierungsaufwand und Regelergebnis liefert.

Ein PI-Regler resultiert aus der Parallelschaltung eines P- (Proportional) und eines I- (Integral) Reglers (siehe Blockschaltbild des ausgeführten Reglers, Abbildung 4-12)

Bei richtiger Auslegung und Parametrierung vereint der PI-Regler die Vorteile beider Reglertypen, bei gleichzeitiger Aufhebung ihrer Nachteile [SAMSON AG - Mess- und Regeltechnik, 2012]:

- schnelle Reaktion durch sofortige Stellwirkung bei vorh. Regelabweichung (P-Anteil)
- äußerst stabil (P-Anteil)
- keine bleibende Regelabweichung (I-Anteil)

Das Verhalten eines PI-Reglers wird durch 2 Parameter bestimmt: den Proportionalbeiwert  $K_P$  und die Nachstellzeit  $T_N$ . Der Proportionalanteil sorgt dafür, dass der Regler unmittelbar bei Vorhandensein einer Regelabweichung (Differenz zwischen Sollwert und Istwert) reagiert. Der Integralanteil summiert die anstehende Regelabweichung über die Zeit auf und wirkt

dadurch erst zeitverzögert. Die Nachstellzeit  $T_N$  gibt dabei jene Zeitspanne an, die der Integralanteil benötigen würde um dieselbe Änderung der Stellgröße herbeizuführen, welche der Proportionalanteil sofort bei Anliegen einer entsprechenden Regelabweichung liefert. Sie ist somit ein Maß dafür, wie stark die zeitliche Dauer der Abweichung in die Regelung eingreift [SAMSON AG - Mess- und Regeltechnik, 2012].

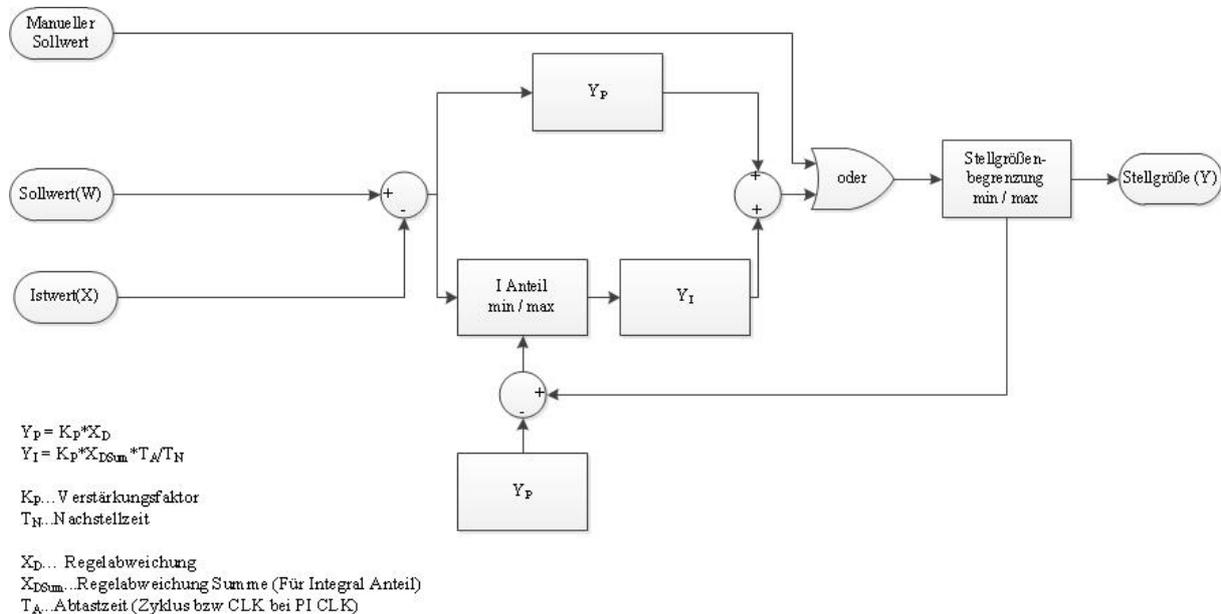


Abbildung 4-12: Blockschaltbild des ausgeführten PI-Reglers mit Anti-Windup

Da in einem Tunnel immer nur eine limitierte Anzahl an Strahlventilatoren zur Verfügung steht, muss die Stellgröße entsprechend begrenzt werden. Die Stellgröße die der Regler liefert kann dadurch niemals größer werden als die tatsächlich vorhandene Anzahl an Stellgliedern (Strahlventilatoren). Tritt eine solche Sättigung tatsächlich ein (es sind also bereits alle verfügbaren Ventilatoren aktiv), kann es jedoch (je nach Dynamik des Reglers bzw. abhängig von der Dimensionierung des Lüftungssystems) dazu kommen, dass weiterhin eine Regelabweichung am Eingang des Reglers anliegt. Dies würde in diesem Fall dazu führen dass die anstehende Regelabweichung im Integrator weiter aufsummiert wird (der I-Anteil des Reglers steigt weiter an), obwohl die resultierende Stellgröße bereits ihr Maximum erreicht hat. Kommt es nun zu einem Vorzeichenwechsel der Regelabweichung, würde der Integrator zuerst diesen Überschuss des I-Anteils sukzessive abbauen müssen bevor die resultierende Stellgröße (Summe aus Proportional- und Integralteil) wieder unter die gesetzte Begrenzung fällt. Je nachdem wie lange eine solche Sättigung ansteht kann damit ein erheblicher Zeitverlust in der Regelung einhergehen. Erst wenn der deutlich schnellere P-Anteil den I-Überschuss sozusagen auszugleichen vermag kommt es wieder zu echten Schalthandlungen im System. Zusätzlich besteht dabei auch noch die Gefahr dass der Regler vorübergehend zu schwingen beginnt und unnötige Schalthandlungen durchgeführt werden.

Aus diesem Grund muss zusätzlich zur Begrenzung der Stellgröße selbst auch eine Begrenzung des Integral-Anteils des Reglers erfolgen. Tritt eine Sättigung ein erfolgt im Integrator keine weitere Aufsummierung der Regelabweichung mehr. Diese Maßnahme wird als sogenanntes ‚Anti-Windup‘ bezeichnet und es gibt dafür unterschiedlichste Ansätze in der Literatur. Im gegenständlichen Fall wurde eine Variante des Anti-Windup ausgeführt, welche den I-Anteil permanent an der Sättigungsgrenze deckelt (siehe hierzu auch Blockschaltbild in Abbildung 4-12). Die Differenz aus eingestellter Sättigungsgrenze und aktuellem

Proportionalanteil liefert den jeweils zu diesem Zeitpunkt maximal möglichen I-Anteil. Der Vorteil dieser Variante gegenüber vieler anderer liegt darin, dass nicht nur der Integrator bei Sättigung angehalten wird sondern auch die aktuelle Höhe des P-Anteils bei der Decekelung berücksichtigt wird. Da die resultierende Stellgröße ja die Summe aus P- und I-Anteil darstellt erfolgt die Begrenzung des I-Anteils daher so früh wie möglich, wodurch negative Auswirkungen durch die integrierenden Teile des Reglers so gering wie möglich gehalten werden.

#### 4.4.4 Zusätzliche steuerungstechnische Maßnahmen

Damit die Regelung an die Gegebenheiten realer Lüftungsanlagen möglichst gut angepasst und eine Umsetzung auch an Anlagen mit ausschließlich netzbetriebenen Strahlventilatoren möglich ist, müssen einige zusätzliche steuerungstechnische Maßnahmen vorgesehen werden. Alle Maßnahmen wurden voll parametrierbar ausgeführt, so dass Änderungen und Anpassungen jederzeit und ohne großen Aufwand während der Inbetriebnahme möglich sind.

##### 4.4.4.1 Dynamische Stellgrößenbegrenzung für das Anti-Windup

Um eine vorhandene Rauchsichtung im Brandfall möglichst lange aufrechterhalten zu können, sehen alle einschlägigen Richtlinien vor dass Ventilatoren in unmittelbarer Nähe zum Brandort nicht aktiviert werden dürfen. Die maximale Anzahl an tatsächlich für die Regelung verfügbaren Ventilatoren hängt somit immer von der Lage der ausgelösten Brandzone ab. Je nach Anlagenausführung und Abstand der Ventilatoren zueinander kann dies dazu führen dass in einigen Brandzonen ein oder sogar mehrere Ventilatorstandorte nicht zur Verfügung stehen. Damit das in Kapitel 4.4.3 beschriebene ‚Anti-Windup‘ jedoch korrekt arbeiten kann muss die Begrenzung der Stellgröße von der Steuerung dynamisch (also an den tatsächlichen Brandort) angepasst werden.

In der Steuerung wurde für jede mögliche Brandzone die tatsächlich maximale Anzahl an Strahlventilatoren für die Regelung der Längsgeschwindigkeit hinterlegt. Bei Brandauslösung wird der Wert für die Stellgrößenbegrenzung vom Regler entsprechend aus der Leittechnik übernommen.

##### 4.4.4.2 Schalthysterese

PI-Regler liefern immer einen kontinuierlichen Stellgrößenverlauf. Dies würde bei einer Lüftungsanlage bedeuten, dass zwingend zumindest ein Strahlventilator über eine Drehzahlregelung verfügen muss damit die gelieferte Stellgröße entsprechend umgesetzt werden kann. Es gilt daher eine steuerungstechnische Lösung zu finden, die eine Umsetzung auch bei Anlagen mit ausschließlich netzbetriebenen Ventilatoren ermöglicht.

Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die aus den Maßnahmen resultierende Schalthäufigkeit der Strahlventilatoren möglichst gering bleibt. Andernfalls riskiert man bei zu hoher Schaltaktivität den dauerhaften Ausfall von Ventilatoren. Die hohen Anlaufströme in den Wicklungen der Ventilatoren führen zu einer extrem schnellen Erwärmung derselben, wodurch die Anlaufströme weiter zunehmen. Dies führt sehr schnell dazu, dass der Leistungsschalter betroffener Ventilatoren fällt. Da dieser nur per Hand und direkt vor Ort in der Betriebszentrale wieder zurückgesetzt werden kann, fallen betroffene Ventilatoren nachhaltig für die Regelung aus.

Die Einführung einer parametrierbaren Schalthysterese hat sich in diesem Zusammenhang als äußerst effektiv erwiesen:

##### Beispiel:

*Eine Schalthysterese von  $\pm 0,6$  bedeutet z.B. dass erst bei einer Stellgröße des Reglers über 1,6 ( $=1,0+0,6$ ) ein zweiter Ventilator zugeschalten wird, umgekehrt erfolgt das Wegschalten desselben erst wieder bei einer Stellgröße unter 1,4 ( $=2,0-0,6$ ).*

Diese Schalthysterese führt in Verbindung mit der natürlichen Trägheit der Regelstrecke dazu, dass selbst bei ungünstigen Bedingungen ‚unnötige‘ Schalthandlungen unterbunden und entstehende Grenzyklen soweit abgeschwächt werden, dass es zu keiner Überlastung und keinem Ausfall von Ventilatoren kommt.

#### 4.4.4.3 Mittelwertbildung am Eingang des Reglers

Da bei Längslüftungsanlagen der Ist- und bei Anlagen mit Absaugung auch der Sollwert von Geschwindigkeitssensoren geliefert wird, welche, je nach Messprinzip und Ausführung, zum Teil recht sprunghafte Änderungen aufweisen können bzw. recht empfindlich auf Störungen (z.B. vorbeifahrende Fahrzeuge, etc.) reagieren, sollte immer ein parametrierbarer, gleitender Mittelwert auf den Eingang des Reglers (Regelabweichung) gelegt werden.

Zahlreiche Tests an unterschiedlichen Systemen und Anlagen haben gezeigt, dass ein gleitender Mittelwert von 5 Sekunden am Reglereingang keine merkbaren Auswirkungen auf die Reaktionszeit des Reglers hat, und gleichzeitig zuverlässig vor unnötigen Schalthandlungen durch normale Schwankungen in der Sensorik schützt.

Sollten die Schwankungen der Eingangsgröße jedoch trotzdem zu starken, vorübergehenden Stellgrößenänderungen führen, so muss die Mittelungszeit entweder entsprechend erhöht oder noch zusätzliche Maßnahmen zur Glättung (z.B. Filter) vorgesehen werden.

#### 4.4.4.4 Totband für die Regelabweichung

Charakteristisch für einen kontinuierlichen Regler mit I-Anteil ist immer dass versucht wird voll auszuregeln, das heißt die tatsächlich vorhandene Regelabweichung auf 0 zu bringen.

Selbst nur geringfügige und vor allem vorübergehende Schwankungen des Istwerts führen daher auf Grund des P-Anteils oft schon zu Schalthandlungen, welche jedoch streng genommen nicht notwendig wären um den Sollwert stabil halten zu können. Um die Schalthäufigkeit der Ventilatoren in einem gewissen Toleranzbereich um den eigentlichen Sollwert herum so gering wie möglich zu halten, empfiehlt es sich daher ein sogenanntes ‚Totband‘ um den Sollwert zu legen. Befindet sich der Istwert innerhalb dieses Toleranzkorridors, wird die Regelabweichung automatisch gleich 0 gesetzt. Dadurch wird der P-Anteil des Reglers ebenfalls gleich 0 und der I-Anteil wird sozusagen am Letztstand eingefroren. Somit ändert sich die Gesamtstellgröße des Reglers, solange der Istwert innerhalb des Totbandes liegt, nicht wodurch es auch zu keinen Schalthandlungen kommen kann. Erst wenn der Istwert den Korridor nach oben oder unten verlässt wird wieder die tatsächlich vorhandene Regelabweichung auf den Reglereingang geschickt wodurch Schalthandlungen wieder möglich werden.

Ein Totband hat den Vorteil dass es keine negativen Auswirkungen hinsichtlich Linearität und Stabilität des Regelkreises aufweist und gleichzeitig eine effektive Maßnahme gegen zu häufiges Schalten um den Sollwert herum darstellt. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass damit eine bleibende Regelabweichung in der Größenordnung der zugelassenen Toleranz (= halbe Totbandbreite) in Kauf genommen wird.

Die [RVS 09.02.31, 2014] gibt als Lüftungsziel ein Geschwindigkeitsband von 1,0 bis 1,5 m/s (bei Gegenverkehr) bzw. 1,5 bis 2,0 m/s (bei Richtungsverkehr) vor. Der Sollwert für den Regler sollte daher bei 1,25 m/s bzw. 1,75 m/s festgelegt werden um den Toleranzbereich nach oben und unten gleich groß zu gestalten. Die Breite des Totbandes sollte somit zwischen +/- 0,15 und +/- 0,25 liegen. Die Erfahrung zeigt, dass auf Grund der zu erwartenden Schwankungen der gemessenen Luftgeschwindigkeit in einem Tunnel Totbandbreiten unter +/- 0,15 m/s nahezu ineffektiv sind, während eine Bandbreite größer +/- 0,25 m/s dazu führen kann, dass man dauerhaft außerhalb des Toleranzbereichs gemäß RVS zu liegen kommen kann.

Für Lüftungsanlagen mit (zumindest teilweise) drehzahlregelbaren Ventilatoren genügt in der Regel erfahrungsgemäß eine Totbandbreite von +/- 0,15 m/s, bei Anlagen ohne jede Möglichkeit der Drehzahlregelung sollte die volle Breite von +/- 0,25 m/s ausgeschöpft werden.

#### 4.4.4.5 Startverzögerung des Reglers

Lüftungssysteme mit Absaugung (Punktabsaugung oder Querlüftung) weisen wesentlich höhere Trägheiten auf als längsgelüftete Anlagen, insbesondere während des ‚Hochfahrens‘ des Systems. Bedingt ist dies in erster Linie dadurch, dass zuerst nicht betroffene Abluftklappen (sofern zum Zeitpunkt der Brandauslösung geöffnet) geschlossen werden müssen bzw. die gewünschte Klappe erst vollständig geöffnet werden muss. Anschließend bekommen die Axialventilatoren erst die Freigabe auf Nenndrehzahl zu fahren, was ebenfalls Zeit benötigt. Ist das gewünschte Absaugvolumen einmal erreicht, dauert es jedoch wiederum einige Zeit bis sich eine entsprechende Zuströmung zur Absaugstelle im Fahrraum einstellt. Je nach Anlagenverhältnissen können von der Brandauslösung bis zu einer stabilen Zuströmung zur Absaugstelle 60 bis 90 Sekunden vergehen.

Es ist daher sehr wichtig, dass der Regler erst aktiviert wird, wenn das System einigermaßen stabil läuft. Andernfalls kann es dazu kommen, dass der Regler auf Grund der nicht repräsentativen Ausgangsbedingungen anfänglich falsch reagiert und dieser Fehler auf Grund des Integralanteils über längere Zeit mitgeschleppt wird. Dadurch und im ungünstigsten Fall auch noch durch zusätzliche (auch im Brandfall erforderliche) aktive Ventilatorsperren bei Drehrichtungsumkehr kann es zu unnötigen Verzögerungen und Zeitverlusten kommen.

Dies kann durch eine Startverzögerung bei aktiver Absaugung ganz einfach verhindert werden. Die Umsetzung kann auf zwei Arten erfolgen:

- Ein fixes aber parametrierbares Zeitverzögerungsglied, welches im Rahmen der Inbetriebnahme an die tatsächlichen Anlagenverhältnisse angepasst wird (z.B. Aktivierung des Reglers 50 Sekunden nach Brandauslösung)
- In Abhängigkeit vom Volumenstrom der betroffenen Axialventilatoren (z.B. Aktivierung des Reglers nachdem das Fördervolumen 95% erreicht hat)

## 4.5 Einstellregeln für PI-Regler / Erstparametrierung

Nachfolgend sollen kurz einige bekannte empirische Einstellregeln (sogenannte ‚Faustformelverfahren‘) angeführt werden, die eine einfache und rasche Erstparametrierung eines Reglers erlauben und gleichzeitig eine solide Basis für später eventuell erforderliche Optimierungen bieten können, ohne dabei das exakte mathematische Modell der Regelstrecke kennen zu müssen.

Die Regeln wurden in einigen Fällen hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bzgl. des Führungs- und Störungsverhaltens hergeleitet und erlauben dadurch bereits bei der Auswahl eine Optimierung des späteren Regelverhaltens. Zudem basieren die Einstellkriterien zum Teil auf unterschiedlichen Übertragungsfunktionen die deren Herleitung zu Grunde gelegt wurden.

Voraussetzung für alle betrachteten Einstellregeln ist eine S-förmige Sprungantwort mit Wendepunkt die kein Überschwingen aufweist.

Alle dafür benötigten Werte können mit Hilfe der beiden bereits beschriebenen Verfahren (grafisches Wendetangenten- oder rechnerisches Zeitprozentkennwertverfahren) auf relativ einfachem Weg aus der experimentell bestimmten Sprungantwort der Regelstrecke (des Tunnels) ermittelt werden.

Prinzipiell existieren diese Regeln sowohl für P-, PI- als auch PID-Regler, da in weiterer Folge jedoch nur mehr das Verhalten von PI-Reglern untersucht werden soll, beschränken sich die angeführten Einstellregeln auf diesen Reglertyp.

### 4.5.1 Einstellregeln nach Ziegler und Nichols

Die Einstellregeln nach ZIEGLER und NICHOLS existieren seit dem Jahr 1942 und gehen von einem  $PT_1-T_t$ -Element als Übertragungsfunktion aus (also einem Totzeit- und einem Verzögerungselement 1. Ordnung, siehe 4.3.4). Obwohl diese Einstellregeln ursprünglich für Strecken mit  $PT_1-T_t$  Charakteristik hergeleitet wurden, können sie aber auch für Regelstrecken angewendet werden, die nicht schwingungsfähig sind und eine Verzögerung höherer Ordnung ( $PT_n$ -Elemente) aufweisen [Lutz & Wendt, 2014].

Die Einstellregeln gelten in erster Linie für Strecken mit kleinen Totzeiten und einem Verhältnis von  $T_g/T_u > 3$  [Lutz & Wendt, 2014].

Die Optimierung der angegebenen Werte erfolgte vor allem für sprungartige Störungen am Eingang der Regelstrecke, bei den daraus abgeleiteten Reglereinstellungen ist daher von einem guten Störverhalten zu Lasten des Führungsverhaltens auszugehen [Lutz & Wendt, 2014].

Tabelle 4-8 enthält die Berechnungsformeln nach ZIEGLER und NICHOLS für den Proportionalbeiwert  $K_P$  sowie die Nachstellzeit  $T_N$  des Reglers:

Tabelle 4-8: Einstellwerte nach ZIEGLER und NICHOLS, [Lutz & Wendt, 2014]

Regler-Art	$K_P$	$T_N$	$T_V$
PI-Regler	$0,9 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$3,33 \cdot T_u$	-

#### 4.5.2 Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK

Die Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK stellen einen 1952 entwickelte Vorgehensweise zur optimierten Dimensionierung eines PI-Reglers dar und gelten als Weiterentwicklung der Einstellregeln nach Ziegler und Nichols. Sie sind für Strecken höherer Ordnung anwendbar die kein Überschwingen in der Sprungantwort aufweisen. Insbesondere bei Übertragungstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung können damit in der Regel günstigere Ergebnisse erzielt werden als mit dem Verfahren nach ZIEGLER und NICHOLS [Lutz & Wendt, 2014].

Ein weiterer Vorteil gegenüber den Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS liegt außerdem darin, dass die Herleitung für unterschiedliche Kriterien erfolgte. So kann zwischen optimiertem Führungs- oder Störungsverhalten sowie zwischen einem aperiodischen Regelverlauf bzw. einem gezielten, begrenzten Überschwingen gewählt werden. Dies gibt bereits durch die Wahl des Einstellverfahrens die Möglichkeit das Reglerverhalten je nach Bedarf zu optimieren und kann den Aufwand einer Nachoptimierung nach erfolgter Erstparametrierung deutlich reduzieren.

Auch hier muss berücksichtigt werden, dass der Quotient  $T_g/T_u$  über 3 liegen sollte damit die Einstellregeln ihre volle Gültigkeit behalten [Lutz & Wendt, 2014].

Tabelle 4-9 enthält die von CHIEN, HRONES und RESWICK hergeleiteten Einstellregeln für ein optimiertes Störungsverhalten, wobei zusätzlich zwischen einem aperiodischen Verlauf (ohne / mit minimalem Überschwingen) und einem zulässigen Überschwingen von ca. 20% über den Sollwert gewählt werden kann:

Tabelle 4-9: Einstellwerte für optim. Störungsverhalten – CHIEN, HRONES & RESWICK, [Lutz & Wendt, 2014]

Regler-Art		<i>aperiodischer Regelverlauf (<math>\ddot{u}=0\%</math>) bei Störungssprung</i>	<i>Regelverlauf mit 20% Über- schwingen bei Störungssprung</i>
<i>PI-Regler</i>	$K_P$	$0,60 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,70 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
	$T_N$	$4,00 \cdot T_u$	$2,30 \cdot T_u$

Identische Parametersätze gibt es auch für eine Optimierung des Führungsverhaltens. Die Beziehungen für den PI-Regler sind in Tabelle 4-10 zusammengefasst. Auch hier kann wiederum zwischen einem aperiodischen Verlauf ( $\ddot{u} = 0\%$ ) und einem auf 20% beschränktem Überschwingen gewählt werden:

Tabelle 4-10: Einstellwerte für optim. Führungsverhalten - CHIEN, HRONES & RESWICK, [Lutz & Wendt, 2014]

Regler-Art		<i>aperiodischer Regelverlauf (<math>\ddot{u}=0\%</math>) bei Führungssprung</i>	<i>Regelverlauf mit 20% Über- schwingen bei Führungssprung</i>
<i>PI-Regler</i>	$K_P$	$0,35 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,60 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
	$T_N$	$1,20 \cdot T_u$	$1,00 \cdot T_u$

### 4.5.3 Einstellregeln nach LATZEL

Die Einstellregeln nach LATZEL sind (im Vergleich zu den Regeln nach ZIEGLER und NICHOLS bzw. CHIEN, HRONES und RESWICK) relativ jung und wurden 1993 hergeleitet.

Sie wurden speziell im Hinblick auf die Zeitprozentkennwertmethode nach SCHWARZE und somit für Übertragungsfunktionen mit mehreren Verzögerungsgliedern ( $PT_n$ -Glieder) entwickelt. Die Berechnung erfolgte nach dem Kriterium der Betragsanpassung [Walter, 2009].

Abhängig von der Ordnung des Systems können entsprechende Faktoren / Verhältnisse zur Berechnung des Proportionalbeiwerts  $K_P$  und der Nachstellzeit  $T_N$  für unterschiedliches gewünschtes Überschwingverhalten aus einer Tabelle entnommen werden.

Die zur Einstellmethode nach LATZEL gehörigen Faktoren / Verhältnisse sind für PI-Regler in Tabelle 4-11 zusammengefasst:

Tabelle 4-11: Einstellwerte PI-Regler – LATZEL; [Hering, Bressler, & Gutekunst, 2014]

Regler-Art	Ordnung n	$\frac{T_N}{T_S}$	$K_P/K_S$	
			bei 10% Überschw.	bei 20% Überschw.
PI-Regler	2	1,55	1,650	2,603
	3	1,96	0,884	1,153
	4	2,30	0,656	0,812
	5	2,59	0,540	0,654
	6	2,86	0,468	0,561
	7	3,1	0,417	0,497
	8	3,32	0,397	0,451

### 4.5.4 Resultierende Parametersets für den Testtunnel (Tunnel Neumarkt – RFB Linz)

Abschließend sollen die hier angeführten Einstellregeln auf die bereits in Kapitel 4.3 untersuchte Regelstrecke des Tunnels Neumarkt (RFB Linz) angewendet werden. Alle dafür erforderlichen Kenngrößen liegen dafür ja bereits vor.

Wie die Untersuchungsergebnisse jedoch gezeigt haben, weichen die Kenngrößen für die beiden Strömungsrichtungen doch merkbar voneinander ab. Der Grund hierfür liegt, wie bereits erörtert, in erster Linie an den nicht neutralen Startbedingungen (Grundströmung durch die natürlichen Randbedingungen wie Wind, Temperaturunterschiede, etc.)

Würde man die benötigten Parameter nun einfach an Hand einer der für die beiden Strömungsrichtungen ermittelten Kenngrößen berechnen, bedeutet dies den Regler für nicht neutrale Bedingungen auszulegen. Da die Grundströmung in einem Tunnel in der Regel jedoch durch äußere Einflüsse hervorgerufen wird, welche spontan aber auch tageszeitbedingt wechseln können, sollte versucht werden diesen Einfluss nach Möglichkeit zu eliminieren.

Da es unter Umständen lange dauern kann bis tatsächlich nahezu neutrale Bedingungen in einem Tunnel vorherrschen, wurde einfach ein Mittelwert der Kenngrößen aus den Sprungantworten für beide Strömungsrichtungen gebildet. Da die Grundströmung während beider Aufzeichnung deutlich im positiven Bereich lag (also in Fahrtrichtung) sollte damit der Einfluss der Grundströmung weitestgehend herausgefiltert werden können.

Tabelle 4-12 zeigt noch einmal eine Zusammenfassung der in Kapitel 4.3 ermittelten Kenngrößen des Tunnels Neumarkt (RFB Linz) für die beiden Strömungsrichtungen sowie die daraus resultierenden Mittelwerte der einzelnen Parameter:

Tabelle 4-12: Kenngrößen aus Streckenidentifikation Tunnel Neumarkt- Mittelwertbildung

<b>Sprungantwort</b>	<b>K<sub>S</sub></b>	<b>T<sub>u</sub></b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>T<sub>S</sub></b>
<i>IN Fahrtrichtung</i>	<i>0,5143</i>	<i>33,02</i>	<i>151,46</i>	<i>41,00</i>
<i>GEGEN Fahrtrichtung</i>	<i>0,9357</i>	<i>39,17</i>	<i>179,68</i>	<i>48,34</i>
<b>Mittelwert</b>	<b>0,7250</b>	<b>0,9357</b>	<b>165,57</b>	<b>44,67</b>

Ausgehend von diesen gemittelten Kenngrößen wurden nun für die in diesem Kapitel aufgeführten Einstellregeln die Reglerparameter (Proportionalbeiwert  $K_P$  und Nachstellzeit  $T_N$ ) berechnet. Die Ergebnisse für die RFB Linz des Tunnels Neumarkt sind in Tabelle 4-13 zusammengefasst:

Tabelle 4-13: resultierende Reglerparameter Tunnel Neumarkt – RFB Linz

<b>Einstellregel</b>		<b>Proportionalbeiwert K<sub>P</sub></b>	<b>Nachstellzeit T<sub>N</sub></b>
<b>ZIEGLER und NICHOLS</b>		5,69	120,21
<b>CHIEN, HRONES und RESWICK</b>	<i>optimiert auf Störung</i>	<i>aperiodisch</i>	3,80
		<i>20% Überschwingen</i>	4,43
	<i>optimiert auf Führung</i>	<i>aperiodisch</i>	2,21
		<i>20% Überschwingen</i>	3,80
<b>LATZEL</b>		0,84	87,55

Wie die Ergebnisse zeigen, variieren die Werte, je nach Einstellverfahren, zum Teil deutlich. Insbesondere bei den Proportionalbeiwerten  $K_P$  reichen die Werte von 0,84 bis 5,69, was eine enorme Bandbreite darstellt. Die errechneten Nachstellzeiten weisen ebenfalls eine recht große Spreizung auf und liegen zwischen 83,03 s und 198,68 s.

Die Auswirkungen dieser Unterschiede auf das Führungs- und Störverhalten sollen in den nachfolgenden Kapiteln durch Realtests an der Tunnelanlage untersucht und bewertet werden.

## 4.6 Vergleichende Realtests des Führungs- und Störverhaltens

In Kapitel 4.5 wurden auf Basis unterschiedlicher Einstellregeln aus der Literatur für die RFB Linz des Tunnels Neumarkt insgesamt 6 Parametersätze als Ersteinstellung für einen PI-Regler ermittelt (siehe hierzu auch Tabelle 4-13).

Diese Parametersätze sollen in weiterer Folge in Verbindung mit dem ausgewählten und ausgeführten Regler (siehe hierzu Kapitel 4.4.3) an der realen Tunnellüftungsanlage des Tunnels Neumarkt untersucht, beurteilt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Beurteilt soll dabei sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten werden. Es wird dabei zwischen dem Führungs- und dem Störverhalten unterschieden. Das Führungsverhalten entspricht der Reaktion des Regelkreises bei Änderung der Führungsgröße (Sollwert). Das Störverhalten hingegen entspricht der Reaktion des Regelkreises auf äußere Änderungen (Störgrößen wie Wind, sich entwickelnder Auftrieb, ...).

Dazu wurden für alle Parametersätze getrennte Tests zum Führungs- und Störverhalten durchgeführt und die Antwort der Regelstrecke aufgezeichnet. Alle durchgeführten Untersuchungen wurden anschließend ausgewertet und nach einem einheitlichen Schema beurteilt. Abschließend erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse.

### 4.6.1 Führungsverhalten

Abbildung 4-13 zeigt den zeitlichen Verlauf einer Regelgröße  $x(t)$  nach einer sprunghaften Änderung der Führungsgröße  $w$ :

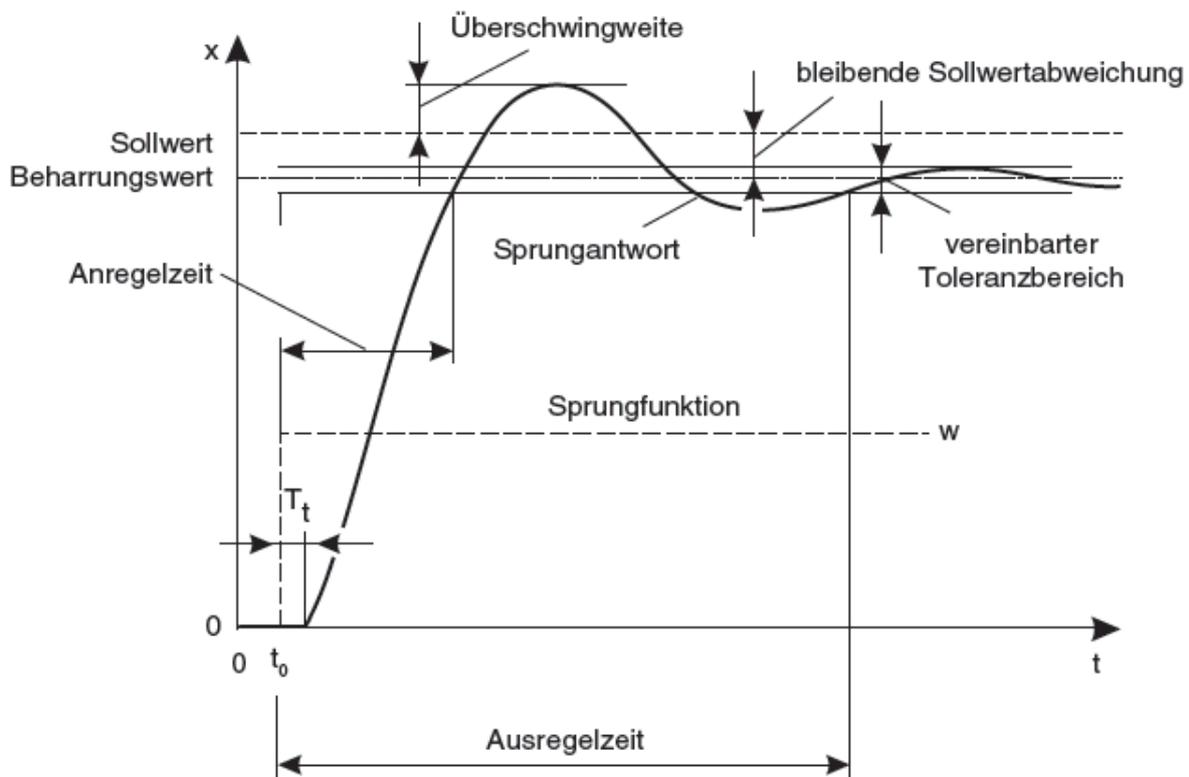


Abbildung 4-13: zeitliches Verhalten der Regelgröße nach einem Sprung der Führungsgröße, [DIN 19226-1 bis 6, 1994]

Bei der ersten Kenngröße handelt es sich um die sogenannte **Totzeit**  $T_t$ . Diese kennzeichnet jene Zeitspanne, die vergeht bis nach erfolgtem Führungsgrößensprung eine erste erkennbare Änderung der Regelgröße eintritt [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Diese Kenngröße ist jedoch in erster Linie bedingt durch die Regelstrecke selbst und kann durch die Parametrierung des Reglers kaum beeinflusst werden. Die Größenordnung der zu beobachtenden Totzeiten sollte somit in allen Tests ähnlich sein, für alle weiteren Beurteilungen und Vergleiche wird dieser Wert daher nicht herangezogen.

Das zweite Merkmal stellt die **Anregelzeit**  $t_{AN}$  dar. Die Anregelzeit entspricht jener Zeitspanne welche vergeht bis die Regelgröße erstmals einen vorab vereinbarten Toleranzkorridor (Sollwert  $\pm x\%$ ) erreicht [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Die Erfahrung zeigt, dass auf Grund der Beschaffenheit der Regelstrecke, der zu regelnden Größe und der verwendeten Messprinzipien zur Erfassung der Längsgeschwindigkeit im Tunnel (siehe hierzu auch Kapitel 2) im eingeschwungenen, stationären Zustand eine zulässige Schwankungsbreite von  $\pm 5\%$  eine sinnvolle Größe darstellt.

Eine der wesentlichsten Kenngrößen bildet in weiterer Folge die **Ausregelzeit**  $t_{AUS}$ . Sie stellt die Zeitspanne vom erfolgten Sollwert- oder Führungsgrößensprung ( $t = 0$ ) bis zum letztmaligen und dauerhaften Erreichen des definierten Toleranzbereichs dar. Die Ausregelzeit ist somit das Maß dafür, wie lange der Regler dafür braucht die Regelgröße im tolerierten Bereich um den neuen Sollwert zu stabilisieren [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Eine **Sollwertabweichung** liegt vor solange sich Führungsgröße (Sollwert) und Regelgröße (Istwert) voneinander unterscheiden. Es wird dabei zwischen einer vorübergehenden Sollwertabweichung und einer bleibenden Sollwertabweichung unterschieden. Von einer vorübergehenden Sollwertabweichung spricht man, wenn es während des Übergangs von einem alten stationären Zustand zu einem Neuen (z.B. während einer Sollwertänderung) zu Abweichungen zwischen Führungs- und Regelgröße kommt. Von bleibenden Sollwertabweichungen hingegen spricht man, wenn (abhängig vom Reglertyp) auch nach dem Einschwingen der Regelgröße eine Abweichung zur Führungsgröße vorliegt. Vorübergehende Sollwertabweichung können nicht vermieden werden und gehören zum Einschwingvorgang. Bleibende Sollwertabweichungen sollten beim gewählten Regler (PI-Regler) auf Grund des I-Anteils keine Auftreten [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Während des Einschwingvorgangs kann es vorkommen, dass die Regelgröße (je nach Reglertyp und Einstellung des Reglers) um den Sollwert schwingt. Gekennzeichnet ist dieses Schwingen durch einen ein- oder mehrmaligen Vorzeichenwechsel der Regelabweichung.

Die **Überschwingweite** stellt dabei die größte feststellbare, vorübergehende Abweichung zwischen Führungs- und Regelgröße (Soll- und Istwert) nachdem die Regelgröße erstmals in den vereinbarten Toleranzbereich eingetreten ist [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Zusätzlich zu diesen normierten und definierten Kenngrößen wurden zur genaueren Beurteilung der Dynamik des Reglers noch 3 weitere eingeführt:

Die **Zeitkennwerte**  $t_{10\%}$  und  $t_{90\%}$  stellen jene Zeitspannen dar die, nach erfolgtem Sollwertsprung, benötigt wird um 10 bzw. 90% der zum Zeitpunkt bestehenden Differenz zwischen Sollwert und stationärer Anfangsgeschwindigkeit (zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) zu erreichen.

Die Differenz  $t_{90\%} - t_{10\%}$  soll in weiterer Folge als **Anstiegszeit** bezeichnet werden und als Maß für die anfängliche Geschwindigkeit der Regelung dienen.

#### 4.6.1.1 Parametrierung gemäß ZIEGLER und NICHOLS

Abbildung 4-14 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß ZIEGLER und NICHOLS:

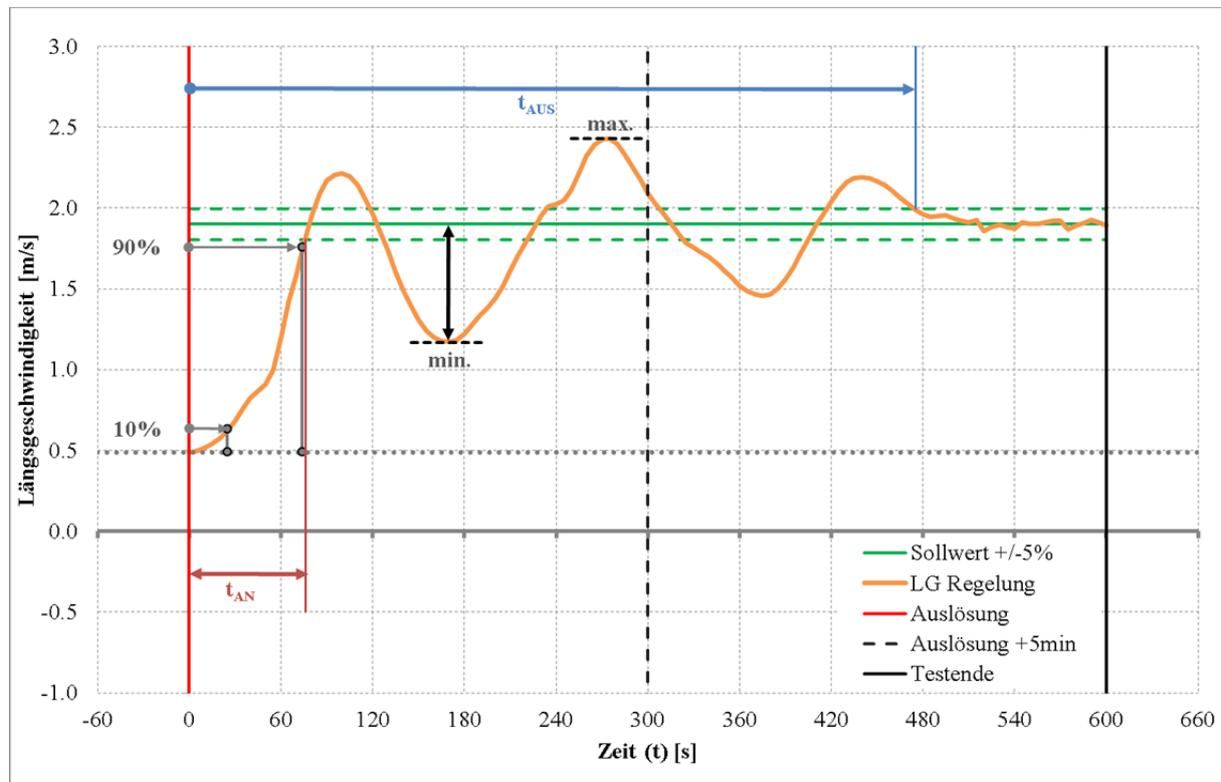


Abbildung 4-14: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung Ziegler und Nichols

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei ca. 0,5 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 1,4 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 25 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 74 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ ) beträgt somit 49 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt 80 Sekunden. Anschließend kommt es zu mehrfachem Über- und Unterschwingen, die maximale Überschwingweite beträgt 2,43 m/s (dies entspricht 27,9 % des Sollwerts). Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 475 Sekunden.

Tabelle 4-14: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. Ziegler und Nichols

Einstellung nach ZIEGLER und NICHOLS - ( $K_P = 5,69 / T_N = 120,21$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
25 s	74 s	49 s	2,43 m/s (+27,9%)	80 s	475 s

Tabelle 4-14 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß Ziegler und Nichols.

Die sehr niedrigen Zeitkennwerte und die sehr gute Anregelzeit unter 1,5 Minuten weist auf eine zeige, dass der Regler eine sehr gutes dynamisches Verhalten aufweist.

Der weitere Verlauf ist jedoch geprägt von mehrfachem Über- und Unterschwingen mit einer relativ hohen maximalen Überschwingweite von 27,9%. Bis die Schwingungen abklingen und der vereinbarte Toleranzbereich dauerhaft erreicht werden kann vergehen insgesamt 475 Sekunden (fast 8 Minuten).

Bedingt ist dieses Verhalten in erster Linie durch den hohen Proportionalbeiwert  $K_p$ . Dieser sorgt zwar durch einen schnellen Anstieg des Proportionalanteils für einen raschen ersten Eintritt in das Toleranzband, gleichzeitig erfolgt aber auch das Wegschalten nach dem Erreichen/Überschreiten des Sollwerts viel zu schnell. Der Integralanteil schafft es in dieser kurzen Zeitspanne nicht diesen Effekt auszugleichen, der Regler ist anfangs zu jedem Zeitpunkt zu schnell für das träge System. Dadurch kommt es zu dem ausgeprägten Einschwingen. Bestätigt wird dies auch durch die Aufzeichnung der Schaltzustände der 7 Strahlventilatoren während des Tests (Abbildung 4-15):

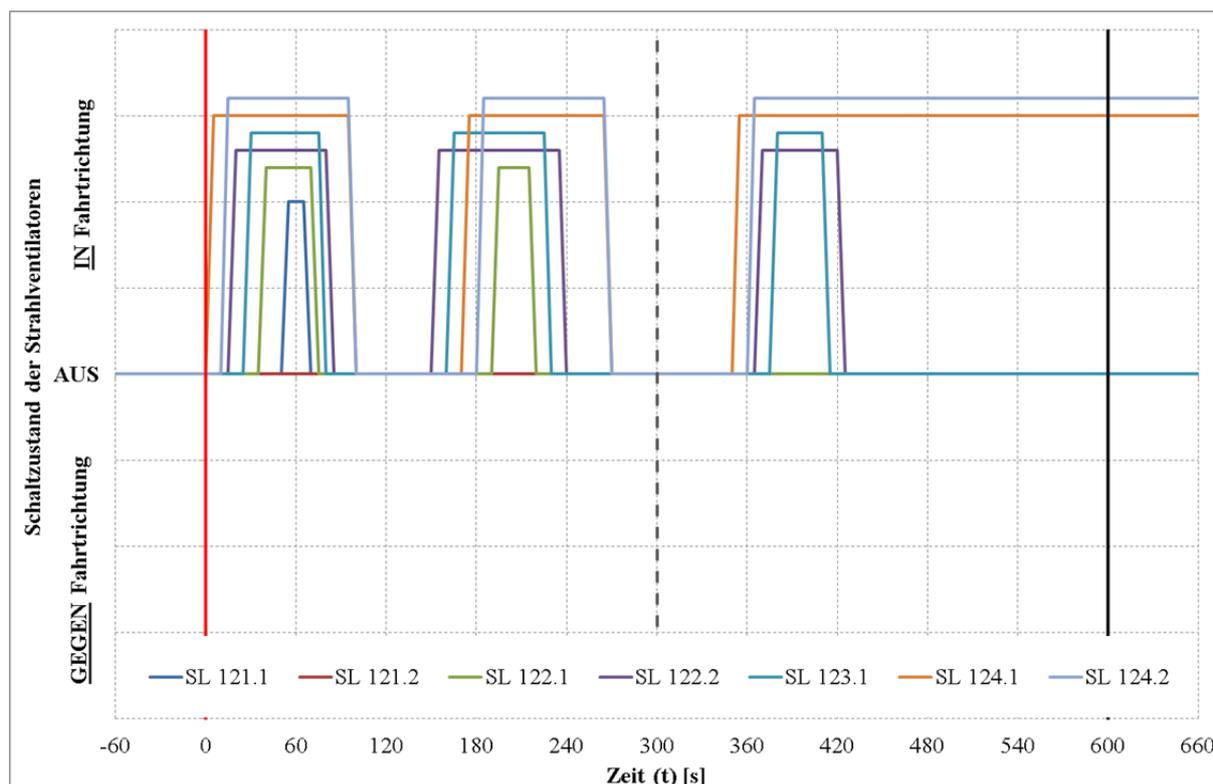


Abbildung 4-15: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung Ziegler und Nichols

Nach insgesamt 60 Sekunden hat der Regler alle 7 Ventilatoren aktiviert, 10 Sekunden später wurde der erste davon jedoch bereits wieder deaktiviert. Nach insgesamt 100 Sekunden (also nur 40 Sekunden nachdem der letzte verfügbare Ventilator zugeschaltet wurde) waren bereits alle Strahlventilatoren wieder deaktiviert. Nur die eingerichtete Schaltsperre zur Vermeidung einer zu raschen Drehrichtungsumkehr hat verhindert, dass in den Bremsbetrieb gewechselt wurde, ansonsten wäre das Schwingen sogar noch stärker ausgefallen.

### 4.6.1.2 Parametrierung nach CHIEN, HRONES und RESWICK (CHR)

#### 4.6.1.2.1 Optimierung für Störverhalten, aperiodischer Verlauf (0% Überschwingen)

Abbildung 4-16 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß CHR (Störung, aperiodisch):

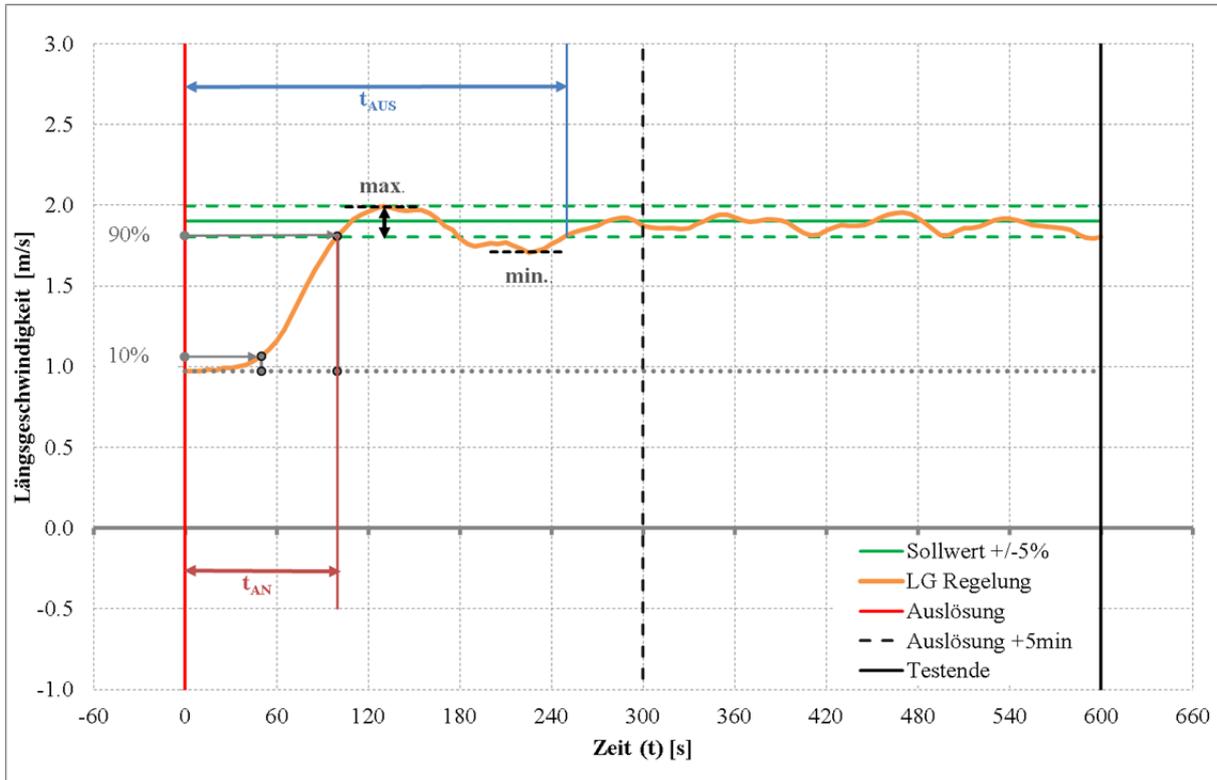


Abbildung 4-16: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Störung, aperiodisch)

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei ca. 0,9 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 1,0 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 50 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 100 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ ) beträgt somit 50 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt ebenfalls 100 Sekunden. Es kommt zu einem geringfügigen Über- und Unterschwingenswigen, die maximale Überschwingweite beträgt 1,99 m/s (dies entspricht 4,74% des Sollwerts). Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 250 Sekunden.

Tabelle 4-15: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. CHR (Störung, aperiod.)

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Störung, aperiod. - ( $K_P = 3,80 / T_N = 144,39$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
50 s	100 s	50 s	1,99 m/s (+4,74%)	100 s	250 s

Tabelle 4-15 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK (optimiert für Störverhalten und aperiodischen Verlauf).

Sowohl die Zeitkennwerte und die daraus abgeleitete Anstiegszeit als auch die Anregelzeit zeugen von einem guten dynamischen Verhalten.

Nach dem erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereichs kann ein einmaliges Über- und Unterschwingen beobachtet werden, die maximale Überschwingweite ist jedoch deutlich niedriger als bei ZIEGLER und NICHOLS. Die Ausregelzeit ist auf Grund des erheblich geringeren Schwingens mit 250 Sekunden (knapp 4 Minuten) deutlich besser als bei ZIEGLER und NICHOLS.

Das, gegenüber ZIEGLER und NICHOLS niedrigere  $K_P$  sorgt für eine nahezu aperiodische Annäherung an den Sollwert mit nur äußerst geringfügigem Über- und Unterschwingen. Proportional- und Integralanteil des Reglers sind gut aufeinander abgestimmt, sodass der Sollwert nach der Beschleunigungsphase ohne große Regelausläge erreicht und gehalten werden kann.

Dies spiegelt sich auch in der Aufzeichnung der Schaltzustände der 7 Strahllüfter während des Tests wieder (Abbildung 4-17):

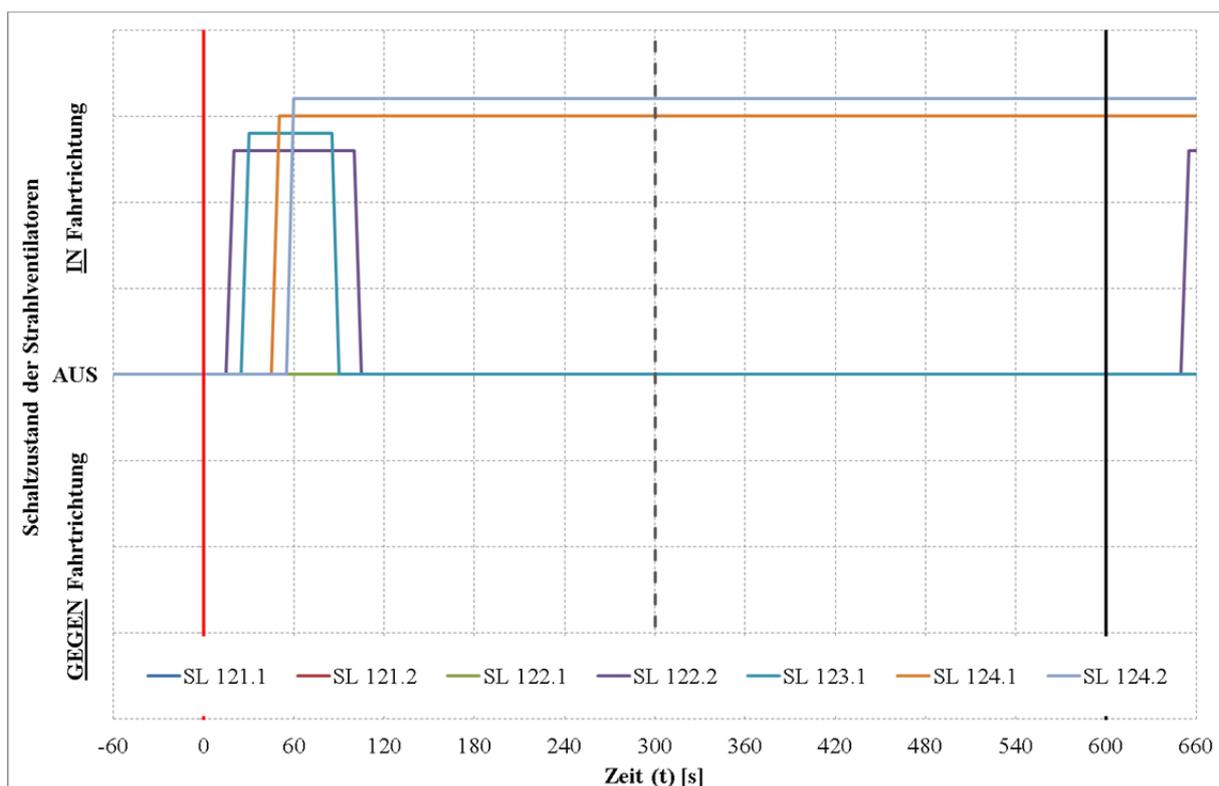


Abbildung 4-17: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Störung, aperiodisch)

Es ist klar zu erkennen dass die Schalthäufigkeit, im Vergleich zu den Einstellungen gemäß ZIEGLER und NICHOLS, deutlich niedriger ist. Der Übergang zwischen Beschleunigungsphase und Halten des Sollwertes ist nahezu nahtlos, das leichte Schwingen konnte alleine durch Anpassung der Drehzahl der beiden FU-gesteuerten Ventilatoren abgefangen werden.

4.6.1.2.2 Optimierung für Störverhalten, begrenztes Überschwingen (20% Überschwingen)

Abbildung 4-24 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ ):

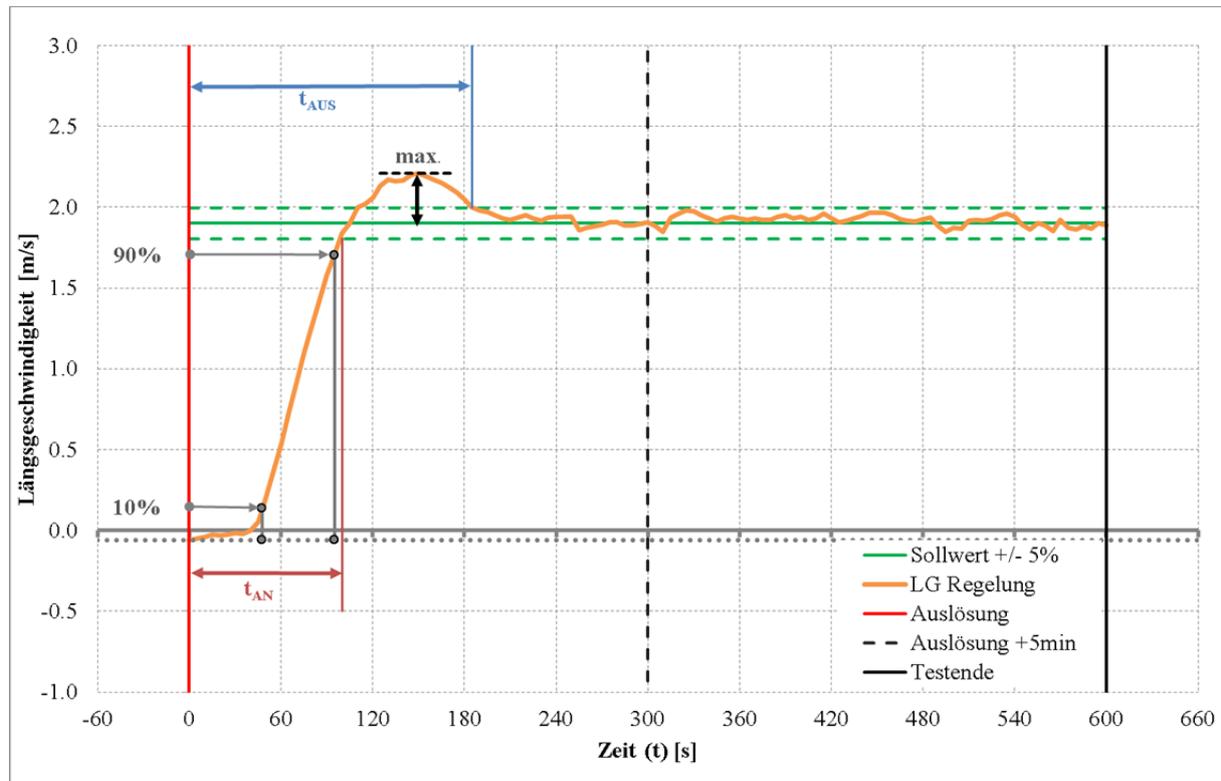


Abbildung 4-18: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei -0,1 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 2,0 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 47,5 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 95 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ ) beträgt somit 47,5 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt 100 Sekunden. Es kommt zu einem leichten Überschwingen, die maximale Überschwingweite beträgt 2,21 m/s (dies entspricht 16,32% des Sollwerts). Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 185 Sekunden.

Tabelle 4-16: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Störung, $\ddot{u} = 20\%$ - ( $K_P = 4,43 / T_N = 83,03$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
47,5 s	95 s	47,5 s	2,21 m/s (+16,32%)	100 s	185 s

Tabelle 4-16 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK (optimiert für Störverhalten und auf ca. 20% begrenztes Überschwingen).

Die ermittelten Zeitkennwerte und die Anregelzeit zeigen ein gutes dynamisches Verhalten. Die Werte sind etwas besser als bei den Einstellungen für den aperiodischen Verlauf, jedoch schlechter als bei den Einstellungen gemäß ZIEGLER und NICHOLS.

Nach dem erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereichs kann ein leichtes Überschwingen (allerdings ohne nachfolgendem Unterschwingen) beobachtet werden. Die Überschwingweite ist höher als bei dem vorher untersuchten aperiodischen Verlauf, jedoch deutlich niedriger als bei ZIEGLER und NICHOLS

Das, gegenüber den Werten für optimiertes Störverhalten bei aperiodischem Verlauf etwas höhere  $K_P$  sorgt für eine schnelle Annäherung an den Sollwert, schwingt dabei jedoch etwas mehr über. Da Proportional- und Integralanteil des Reglers jedoch gut aufeinander abgestimmt sind, kommt es zu keinem anschließenden Unterschwingen, der Sollwert kann rasch wieder erreicht und gehalten werden.

Dieses Verhalten zeichnet sich auch in der Aufzeichnung der Schaltzustände der 7 Strahlblüfer während des Tests ab (Abbildung 4-19):

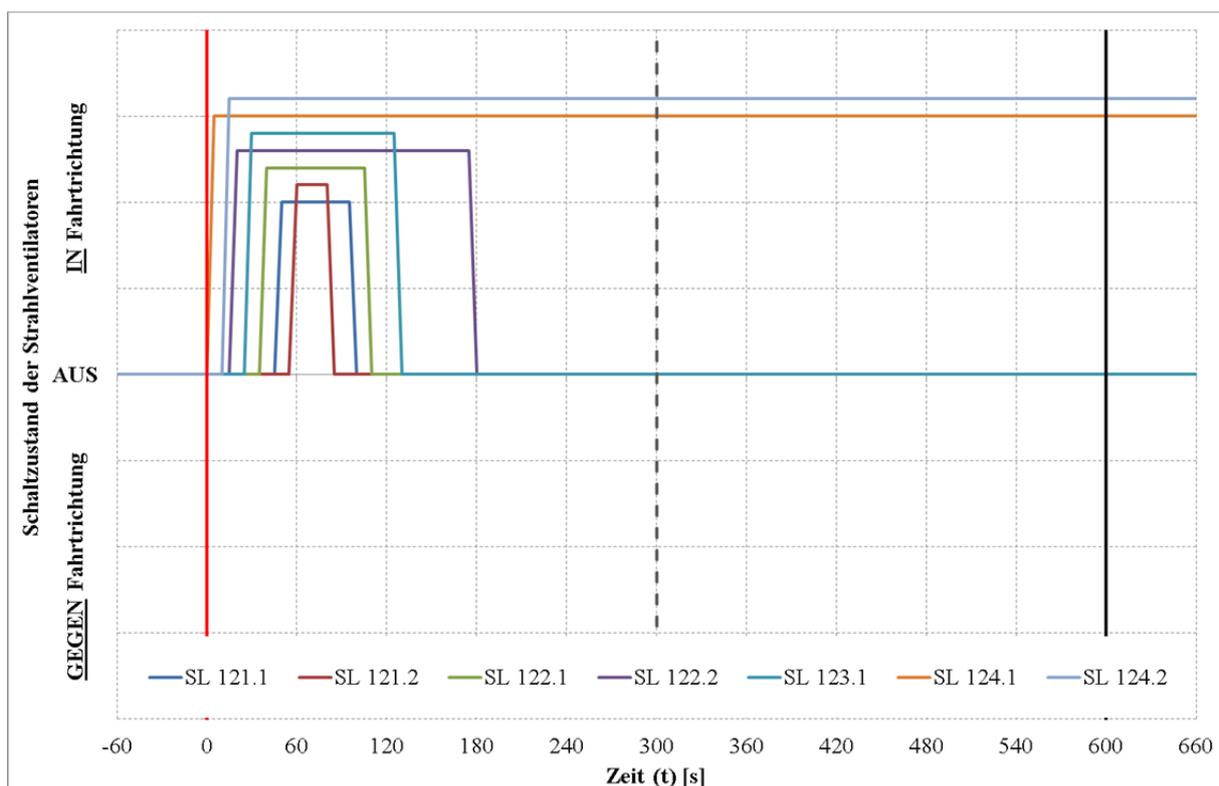


Abbildung 4-19: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die Schalthäufigkeit ist auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie bei den Einstellungen für optimiertes Störverhalten mit aperiodischem Verlauf. Die Zuschaltgeschwindigkeit ist, bedingt durch das höhere  $K_P$ , jedoch etwas höher, wodurch die etwas bessere Dynamik erzielt wird. Das Überschwingen konnte auch in diesem Fall allein durch Anpassung der Drehzahl der beiden FU-gesteuerten Ventilatoren abgefangen werden.

4.6.1.2.3 Optimierung für Führungsverhalten, aperiodischer Verlauf (kein Überschwingen)

Abbildung 4-20 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß CHR (Führung, aperiod.):

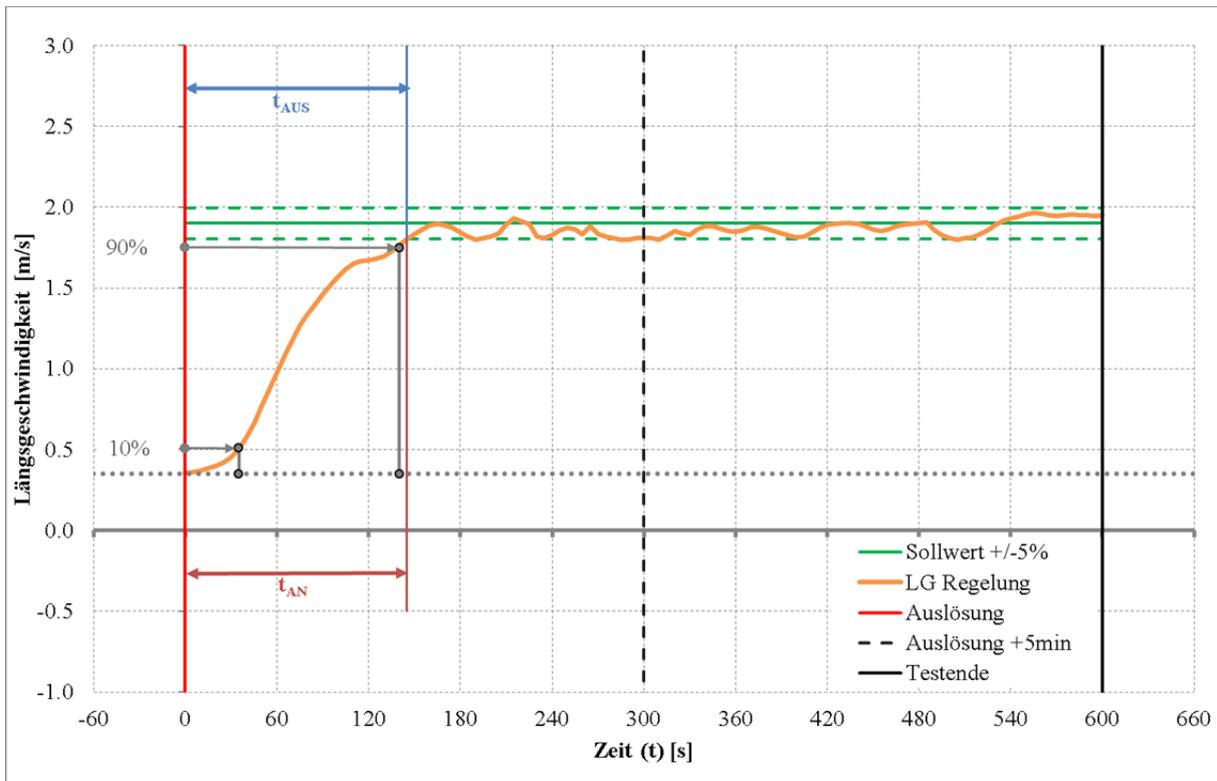


Abbildung 4-20: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Führung, aperiod.)

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei ca. 0,3 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 1,6 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 35 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 140 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ ) beträgt somit 105 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt 145 Sekunden. Es kommt zu keinerlei Überschwingen, die maximale Überschwingweite beträgt daher 0%. Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 145 Sekunden.

Tabelle 4-17: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. CHR (Führung, aperiod.)

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Führung, aperiod. - ( $K_p = 2,21 / T_N = 198,68$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
35 s	140 s	105 s	1,90 m/s (+0%)	145 s	145 s

Tabelle 4-17 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK (optimiert für Führungsverhalten und aperiodischen Verlauf).

Die Zeitkennwerte und die Anregelzeit weisen auf eine eher mäßige Dynamik hin. Die Werte sind, im Vergleich zu den beiden für Störverhalten optimierten Einstellungen, durchwegs langsamer.

Die reduzierte Dynamik führt zu einem perfekt aperiodischen Verlauf, Es kommt zu keinerlei Überschwingen. Deswegen entspricht die Anregelzeit von 145 Sekunden in diesem Fall auch der Ausregelzeit, das Toleranzband wird nach erstmaligem Erreichen nicht mehr verlassen.

Das, gegenüber den Werten für optimiertes Störverhalten deutlich reduzierte  $K_P$  sorgt für eine eher langsamere Annäherung an den Sollwert, schwingt dabei jedoch nicht über, was dazu führt dass die Ausregelzeit deutlich niedriger ist als bei den bisher untersuchten Einstellwerten.

Dieses Verhalten zeichnet sich auch in der Aufzeichnung der Schaltzustände der 7 Strahlblüfer während des Tests ab (Abbildung 4-21):

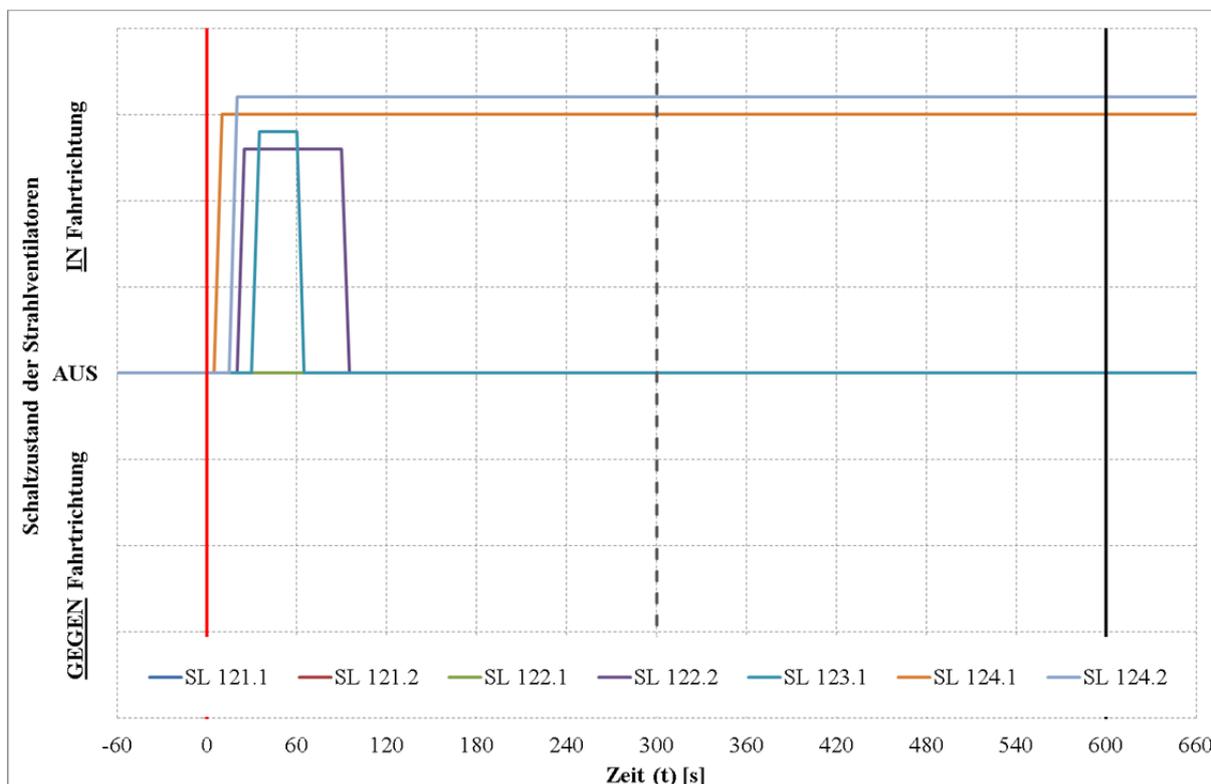


Abbildung 4-21: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Führung, aperiod.)

Die Schalthäufigkeit ist auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie bei den Einstellungen für optimiertes Störverhalten mit aperiodischem Verlauf. Die Zuschaltgeschwindigkeit ist, bedingt durch das kleinere  $K_P$ , jedoch niedriger, wodurch die Dynamik gegenüber den beiden anderen Einstellungen nach CHR etwas geringer ist.

4.6.1.2.4 Optimierung für Führungsverhalten, begrenztes Überschwingen (20% Überschwingen)

Abbildung 4-22 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ ):

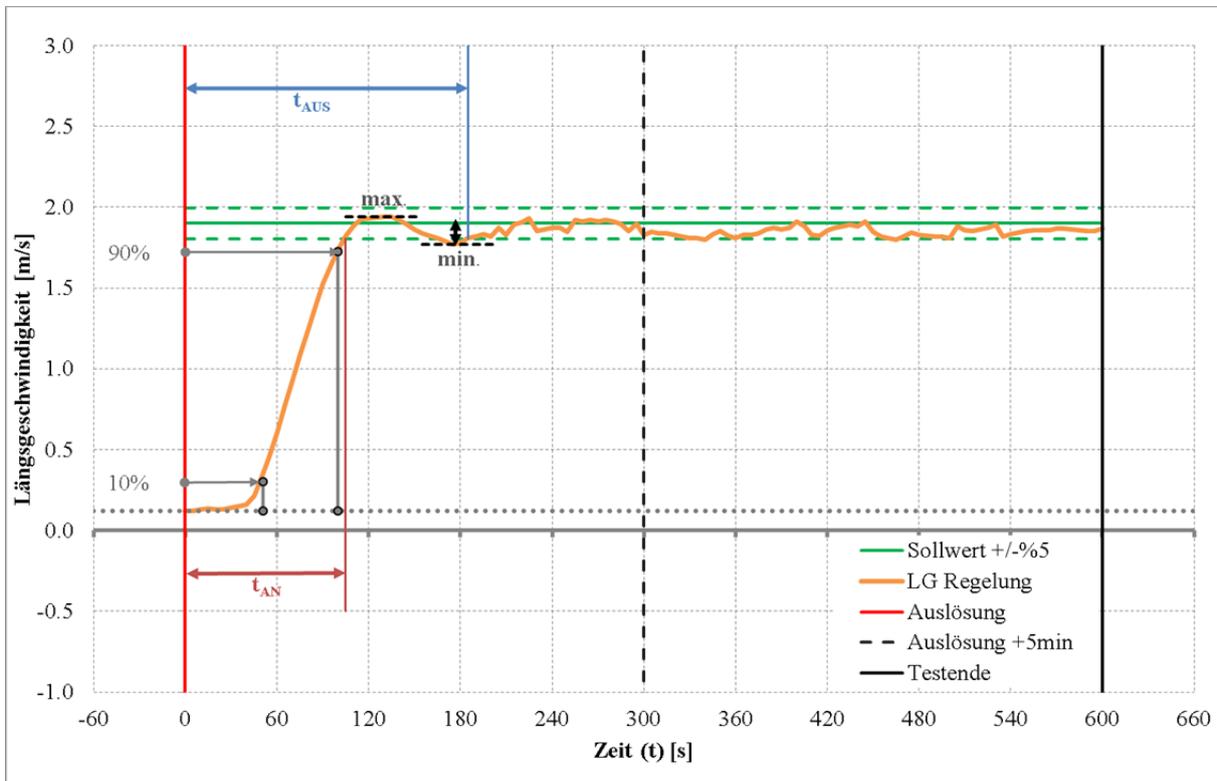


Abbildung 4-22: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei ca. 0,1 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 1,6 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 49 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 100 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%} - t_{10\%}$ ) beträgt somit 51 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt 105 Sekunden. Es kommt zu einem einmaligen, leichten Über- und Unterschwingen, die maximale Überschwingweite beträgt dabei -6,84%. Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 185 Sekunden.

Tabelle 4-18: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Führung, $\ddot{u} = 20\%$ - ( $K_P = 3,8 / T_N = 165,57$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%} - t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
49 s	100 s	51 s	1,77 m/s (-6,84%)	105 s	185 s

Tabelle 4-18 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK (optimiert für Führungsverhalten und auf ca. 20% begrenztes Überschwingen).

Die Zeitkennwerte und die Anregelzeit zeigen nahezu das gleiche, gute dynamische Verhalten wie bei den Einstellwerten für optimiertes Störverhalten bei aperiodischem Verlauf, da beide Parametersätze das gleiche  $K_P$  beinhalten.

Das leichte, einmalige Über- und Unterschwingen fällt jedoch geringer aus als bei den Einstellungen für Störverhalten bei aperiodischem Verlauf. Dies zeigt auch die niedrigere Ausregelzeit von 185 s, da die im Vergleich etwas höhere Nachstellzeit  $T_N$  die Schwingungsneigung reduziert.

Insgesamt zeigt der Parametersatz, sowohl was die Dynamik als auch die Charakteristik betrifft, ähnlich gutes Verhalten wie die Einstellungen für optimiertes Störverhalten bei begrenztem Überschwingen.

Dies ist auch an Hand der Aufzeichnung der Schalthandlungen ablesbar (Abbildung 4-23):

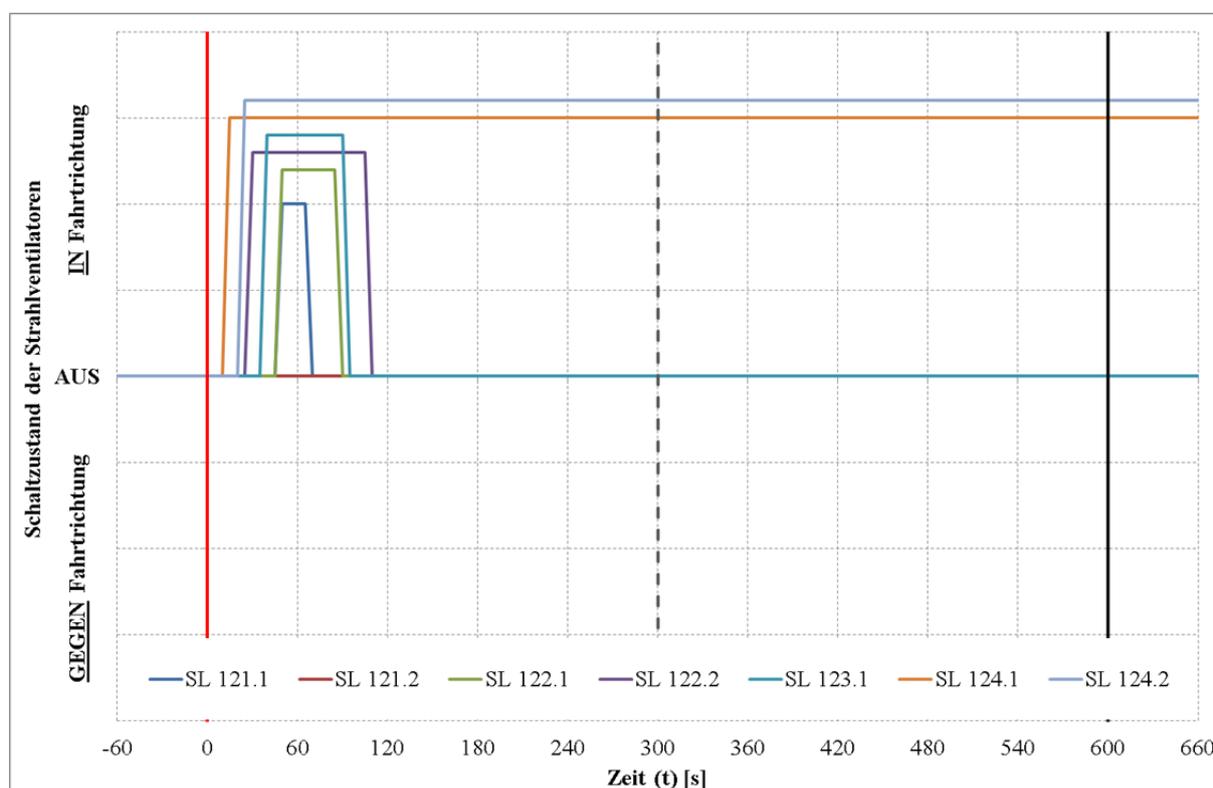


Abbildung 4-23: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Das beobachtete Verhalten ist sowohl was die Schalthäufigkeit als auch die Zuschaltgeschwindigkeit betrifft jenem bei optimiertem Störverhalten und begrenztem Überschwingen sehr ähnlich.

### 4.6.1.3 Parametrierung nach LATZEL

Abbildung 4-24 zeigt das Führungsverhalten der Regelgröße bei einem Sprung der Führungsgröße (Sollwert) auf 1,9 m/s bei Parametrierung gemäß LATZEL ( $\ddot{u} = 20\%$ ):

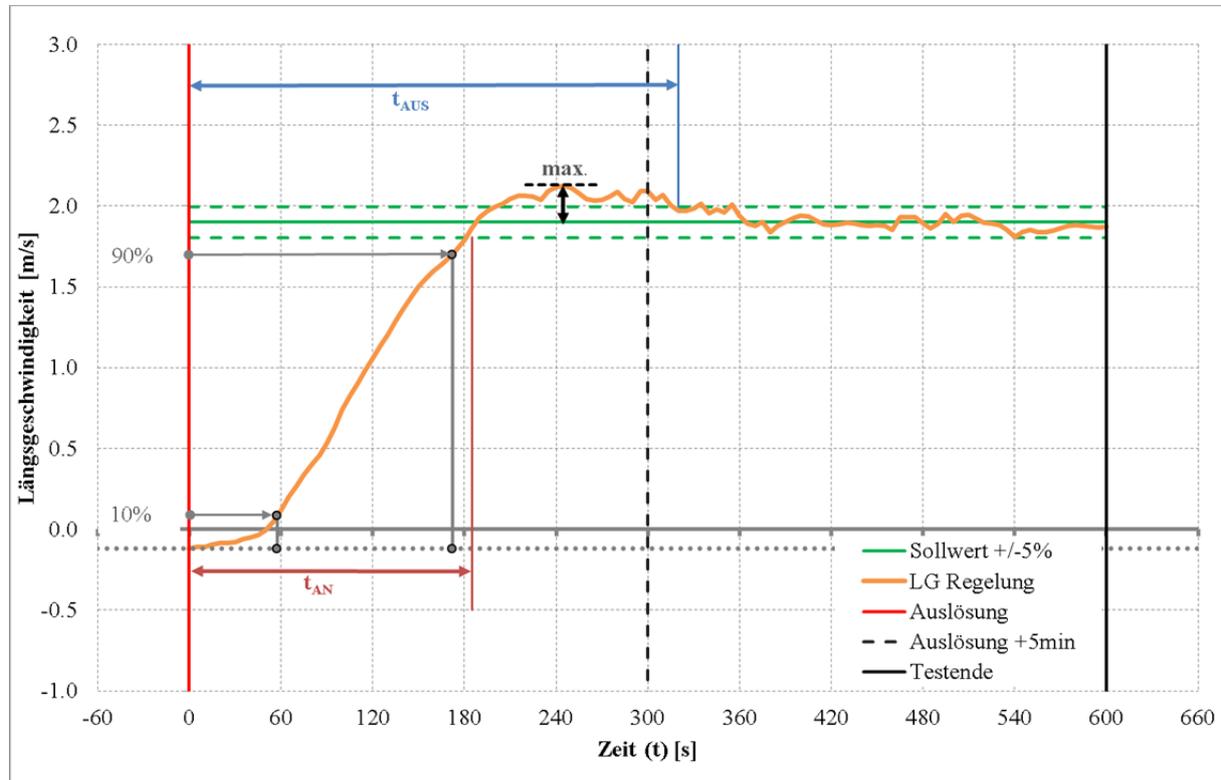


Abbildung 4-24: Führungsverhalten / Regelgröße, Einstellung LATZEL (20% Überschw.)

Der Startwert (stationäre Luftgeschwindigkeit bei Auslösung des Brandes) lag bei -0,1 m/s, die vorübergehende Sollwertabweichung betrug zum Zeitpunkt  $t = 0$  somit ca. 2,0 m/s.

Der Zeitkennwert  $t_{10\%}$ , nach dem der Regler 10% der anfänglich vorliegenden Sollwertabweichung abbauen konnte beträgt 57,5 Sekunden, der Zeitkennwert  $t_{90\%}$  (Abbau von 90% der ursprünglichen Sollwertabweichung) liegt bei 172 Sekunden. Die errechnete Anstiegszeit ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ ) beträgt somit 114,5 Sekunden.

Die Anregelzeit  $t_{AN}$  (Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des vereinbarten Toleranzbereich von +/-5%) beträgt 185 Sekunden. Es kommt zu einem einmaligen, leichten Überschwingen ohne nachfolgendes Unterschwingen, die maximale Überschwingweite beträgt dabei - 12,11 %. Die Ausregelzeit  $t_{AUS}$  (Zeit bis zum dauerhaften Verbleib der Regelgröße innerhalb des Toleranzkorridors) liegt bei 320 Sekunden.

Tabelle 4-19: Kenngrößen Führungsverhalten, Parameter gem. LATZEL

Einstellung nach LATZEL / 20% Überschwingen ( $K_p = 0,84 / T_N = 87,55$ )					
Zeitkennwerte		Anstiegszeit	Überschwingweite	Anregelzeit	Ausregelzeit
$t_{10\%}$	$t_{90\%}$	AZ ( $t_{90\%}-t_{10\%}$ )	ÜS	$t_{AN}$	$t_{AUS}$
57,5 s	172 s	114,5 s	2,13 m/s (+12,11%)	185 s	320 s

Tabelle 4-19 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Kenngrößen zur Beurteilung der Einstellparameter gemäß LATZEL (auf ca. 20% begrenztes Überschwingen).

Sowohl die Zeitkennwerte (und die daraus resultierende Anstiegszeit) als auch die Anregelzeit sind im vorliegenden Fall höher als bei allen anderen bisher untersuchten Einstellungen. Grund hierfür ist das im Vergleich deutlich kleinere  $K_P$ . Das dynamische Verhalten ist in Summe als eher träge zu bezeichnen.

Trotz des niedrigen Proportionalbeiwerts und der eher aperiodischen Annäherung an den Sollwert kommt es zu einem leichten Überschwingen. Das Gegenregeln fällt auf Grund des kleinen  $K_P$ -Werts jedoch entsprechend langsam aus, wodurch auch die Ausregelzeit mit 320 Sekunden (über 5 Minuten) im Vergleich zu den anderen Parametersätzen relativ hoch ausfällt.

Die Einstellwerte nach LATZEL weisen zwar eine deutlich bessere Charakteristik auf als die Einstellungen nach ZIEGLER und NICHOLS, das dynamische Verhalten ist jedoch erheblich träger als bei allen übrigen Parametersätzen.

Dies spiegelt sich auch in den Aufzeichnung der Schaltzustände während des Tests wieder (Abbildung 4-25):

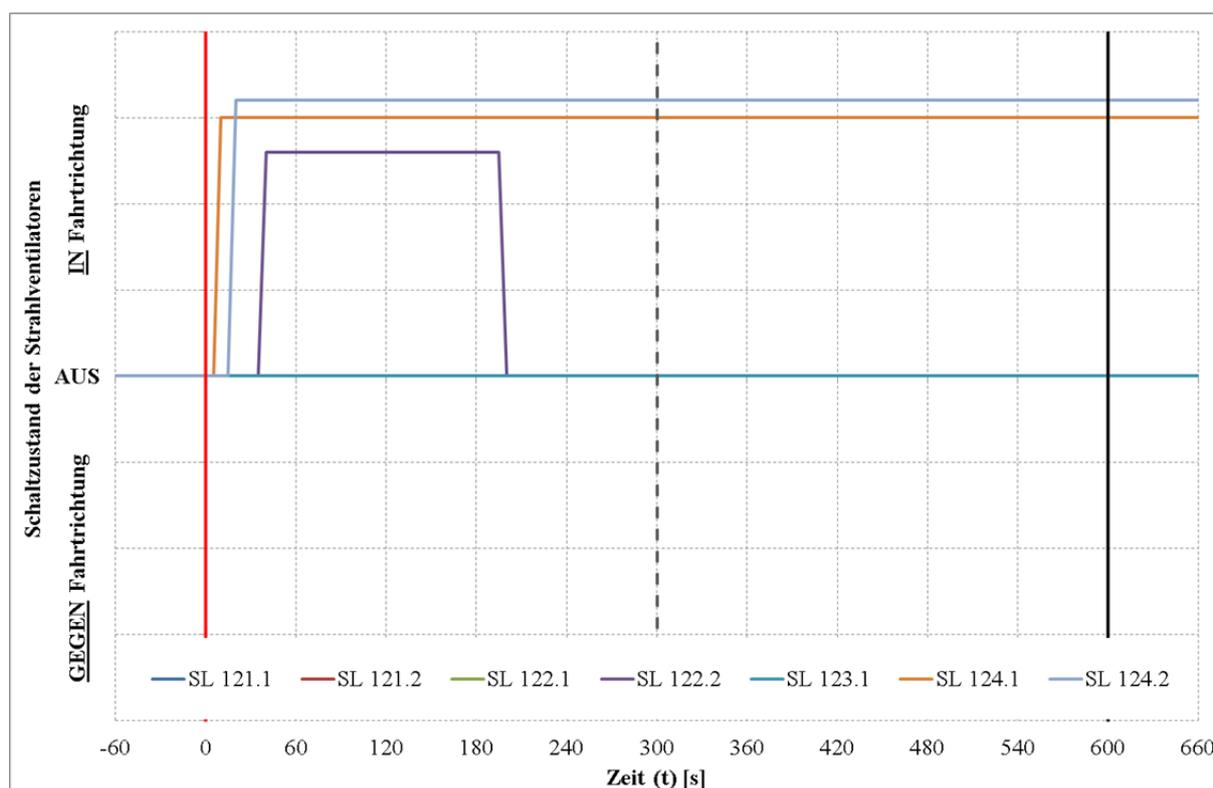


Abbildung 4-25: Führungsverhalten / Schaltzustände, Einstellung LATZEL ( $\ddot{u} = 20\%$ )

Die Zuschaltgeschwindigkeit ist erheblich niedriger als bei allen anderen untersuchten Reglereinstellungen. Dies wirkt sich in weiterer Folge auch positiv auf die Schaltfrequenz aus, es kommt zu wesentlich weniger Schalthandlungen als bei den übrigen Parametersätzen.

#### 4.6.2 Störverhalten

Abbildung 4-26 zeigt, analog zu Kapitel 4.6.1, den zeitlichen Verlauf einer Regelgröße  $x(t)$ , welche sich anfangs in einem eingeschwungenen, stationären Zustand befunden hat, als Reaktion auf die Aufschaltung einer sprungartigen Störgröße  $z$ :

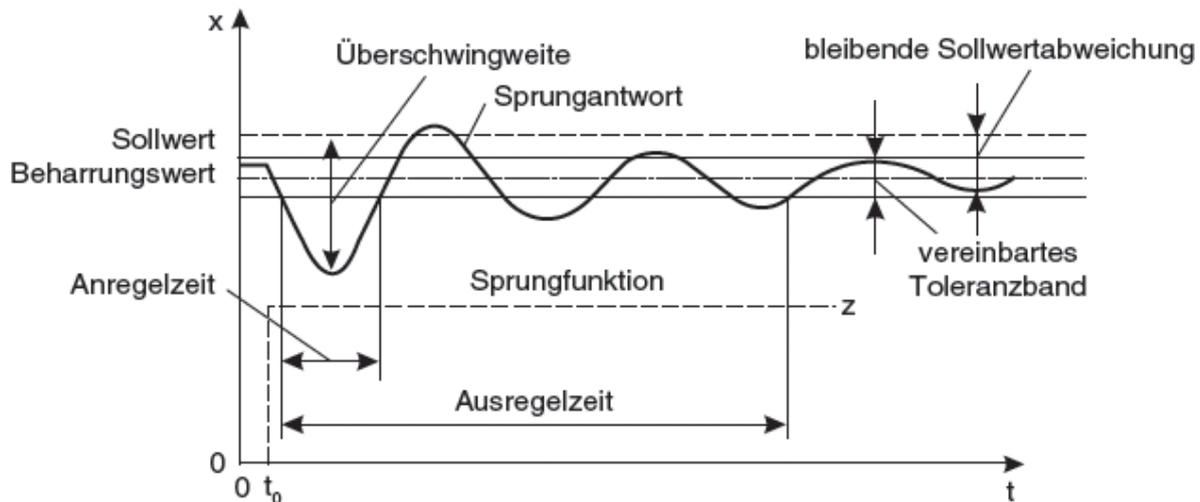


Abbildung 4-26: zeitliches Verhalten der Regelgröße nach einem Sprung einer Störgröße, [DIN 19226-1 bis 6, 1994]

Die Definition der Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens erfolgt ähnlich jener, welche bereits für das Führungsverhalten verwendet wurde.

Die **Anregelzeit**  $t_{AN}$  entspricht diesmal jedoch jener Zeit, die der Regler benötigt um die Regelgröße nach Aufschaltung der Störgröße erstmals wieder in den festgelegten Toleranzbereich zu bringen [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Das Toleranzband wird auf Grund der Streckencharakteristik, analog zum Führungsverhalten, mit  $\pm 5\%$  auf den Sollwert vereinbart.

Die **Ausregelzeit**  $t_{AUS}$  stellt wiederum jene Zeitspanne dar, welche erforderlich ist um die Regelgröße wieder dauerhaft in das zulässige Toleranzband zu führen [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Auch beim Störverhalten wird zwischen vorübergehender und bleibender Sollwertabweichung unterschieden. **Vorübergehende Sollwertabweichungen** stellen dabei Abweichungen zwischen Führungs- und Regelgröße während des erneuten Einschwingens nach erfolgter Störgrößenaufschaltung dar. Ist der Einschwingvorgang nach dem Auftreten einer Störung abgeschlossen und es liegt weiterhin eine statische Abweichung zwischen Führungs- und Regelgröße vor, spricht man von einer **bleibenden Regelabweichung** [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

Vorübergehende Sollwertabweichungen gehören zum Einschwingvorgang dazu und können nicht vermieden werden. Bleibende Regelabweichungen sind auch nach Störungen auf Grund der Wahl des Reglertyps (PI-Regler) nicht zu erwarten.

Die **Überschwingweite** bezeichnet auch beim Störverhalten die größte vorübergehend Sollwertabweichung, welche nach Aufschaltung der Störung festgestellt werden kann [DIN 19226-1 bis 6, 1994].

### Testablauf / Testanordnung

Um das Störverhalten für alle Einstellungen unter einigmaßen konstanten und reproduzierbaren Bedingungen testen zu können wurde mit Hilfe eines mobilen Tunnelventilators der Feuerwehr ein Gegendruck am Ausfahrtsportal (dies entspricht bei einem Richtungsverkehrstunnel auch dem Ausblasportal in dessen Richtung entlüftet wird) erzeugt.

Bei dem mobilen Tunnelventilator handelt es sich um einen drehzahlgeregelten Axialventilatoren welche über einen Riemen von einem Benzinmotor angetrieben wird (Modell MGV L125 der Firma BIG), dessen wichtigste technische Kenngrößen in Tabelle 4-20 zusammengefasst wurden:

Tabelle 4-20: wesentliche technische Daten – mobiler Ventilator BIG MGV L125/105FII

Laufraddurchmesser	Nominalschub	Motorleistung	max. Drehzahl
[mm]	[N]	[kW]	[1/min]
1250	2600	90	1800

Der mobile Ventilator wurde im Vorportalbereich mittig zur Fahrbahnmittelachse aufgestellt, wobei der Abstand zum Tunnelportal so gewählt wurde, dass unter Annahme einer Aufweitung des Luftstrahls von 7 Grad, die Strahlbreite auf Höhe des Portals in etwa die Größenordnung der Fahrbahnbreite des Tunnels erreicht hat (siehe hierzu Abbildung 4-27). Dadurch soll eine möglichst effiziente Schubumsetzung gewährleistet und Beeinflussungen der Strömung im Tunnel (insbesondere im Bereich der Längsgeschwindigkeitsmessstellen) vermieden werden.

Ausgehend von einer Tunnelquerschnittsfläche von 52,39 m<sup>2</sup> und einem angenommenen Schubumsetzungskoeffizienten von 50% entspräche der Standschub von 2600 N in etwa einem ‚Stördruck‘ von ca. 25 Pa. Dies entspricht im vorliegenden Fall des Tunnels Neumarkt 125% des in der Auslegung des Lüftungssystems berücksichtigten Winddrucks und stellt somit eine durchaus repräsentative Störgröße dar.

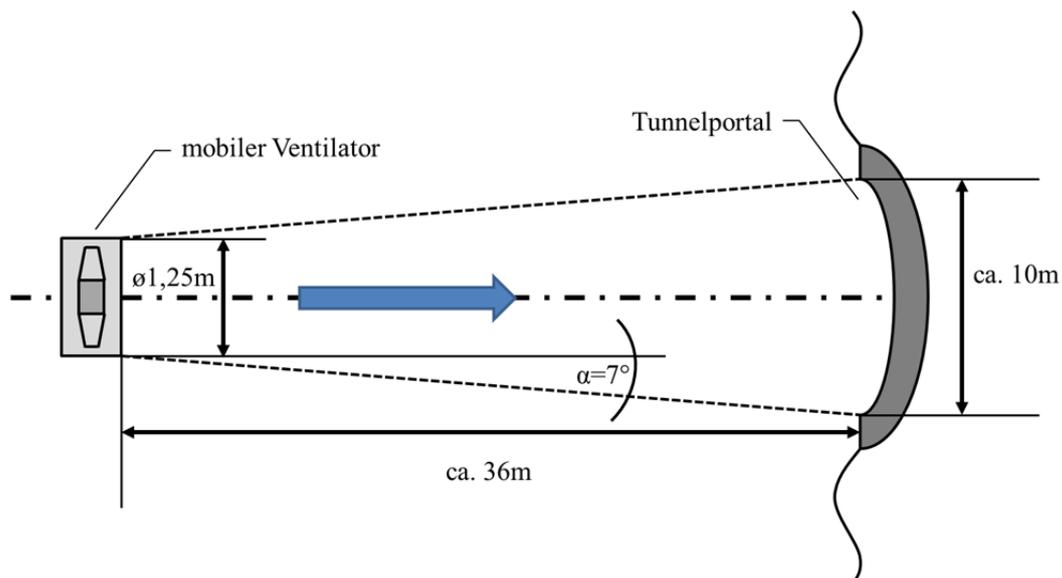


Abbildung 4-27: schematische Testanordnung zur Störgrößenaufschaltung

Der Testablauf für das Störverhalten verläuft in insgesamt 3 Schritten. Als erstes wird die Regelung aktiviert indem manuell ein Brand in einer der übergeordneten Brandzonen der Lüftungssteuerung ausgelöst wird (analog zu den Tests bzgl. des Führungsverhaltens). Parallel dazu wurde der mobile Ventilator aktiviert und auf minimale Drehzahl gebracht.

Da ausschließlich das Verhalten des Reglers auf Störgrößen von außen untersucht werden soll, muss eine Beeinflussung durch Einschwingvorgänge sicher ausgeschlossen werden können. Nach Auslösung des Brandprogramms wurde daher so lange gewartet bis ein eventuell auftretendes Einschwingen zur Gänze abgeklungen ist und der vereinbarte Toleranzbereich (Sollwert  $\pm 5\%$ ) dauerhaft erreicht wurde.

Danach wurde die Drehzahl des mobilen Ventilators aus der Warteposition (minimale Drehzahl) auf das Maximum erhöht. Der Gegendruck am Portal wird dadurch aufgebaut, die Luftgeschwindigkeit im Tunnel beginnt dadurch abzusinken. Dies führt dazu dass der Regler entsprechend reagiert und versucht gegenzusteuern.

Sobald der Toleranzkorridor nach der Aufschaltung der Störgröße wieder dauerhaft erreicht und die Regelgröße nachweislich stabilisiert werden konnte wurde die Störgröße weggeschaltet indem der mobile Ventilator wieder von Maximaldrehzahl auf Warteposition gebracht wurde.

Da der Gegendruck am Ausblasportal dadurch schlagartig wegfällt beginnt die Luftgeschwindigkeit im Tunnel zu steigen, die Lüftungssteuerung muss wieder zurückregeln. Nachdem die Regelgröße nach Wegfall der Störgröße den Toleranzbereich wieder endgültig erreicht und sich stabilisiert hat wird das Brandprogramm quittiert und der mobile Ventilator wieder in Wartestellung (minimale Drehzahl) gebracht – Test und Aufzeichnung der Regel- und Stellgröße werden beendet.

#### 4.6.2.1 Parametrierung gemäß Ziegler und Nichols

In Abbildung 4-28 ist der Verlauf der Regelgröße (Längsgeschwindigkeit) bei Auf- bzw. Wegschaltung der äußeren Störgröße dargestellt:

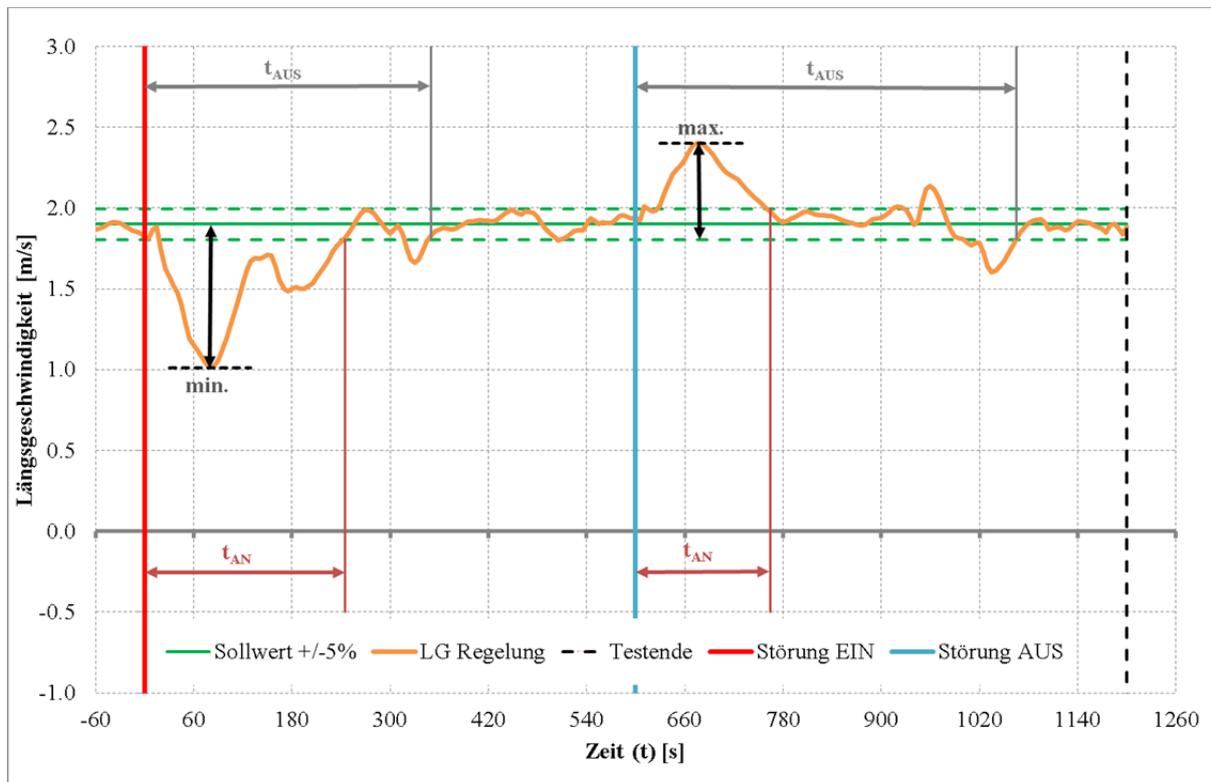


Abbildung 4-28: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung ZIEGLER und NICHOLS

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt -46,8%, jene nach Wegschaltung der Störgröße +26,3%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 245 bzw. 165 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße) beträgt 350 bzw. 465 s.

Tabelle 4-21 enthält eine Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach ZIEGLER und NICHOLS.

Tabelle 4-21: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. ZIEGLER und NICHOLS

Einstellung nach ZIEGLER und NICHOLS - ( $K_p = 5,69 / T_N = 120,21$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wegschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
1,01 m/s (-46,8%)	245 s	350 s	2,40 m/s (+26,3%)	165 s	465 s

Die Aufzeichnung der Regelgröße (Abbildung 4-28) zeigt, dass die Grunddynamik der Regeleinstellungen bzgl. des Störverhaltens prinzipiell recht gut ist, die Zeitspanne bis zum ersten Wiedereintritt in den Korridor (Anregelzeit) ist sowohl beim Auf- als auch beim Wegschalten mit 245 bzw. 165 Sekunde recht kurz.

Die Überschwingweite beträgt trotz der recht schnellen Reaktion des Regler bei Aufschaltung ca. -46,8%, beim Wegschalten 26,3%.

Durch das hohe  $K_p$  schaltet der Regler jedoch in Summe viel zu schnell für die Trägheit des Systems, was auch die Darstellung der Schaltzustände in Abbildung 4-29 zeigt. Dadurch schwingt die Regelgröße (wie dies auch bereits bei der Untersuchung des Führungsverhaltens festgestellt werden konnte) mehrmals nach, was dazu führt dass die Zeitspanne bis zum permanenten Wiedereintritt in den Toleranzbereich (Ausregelzeit) in beiden Fällen mit 350 bzw. 465 Sekunden sehr hoch ist.

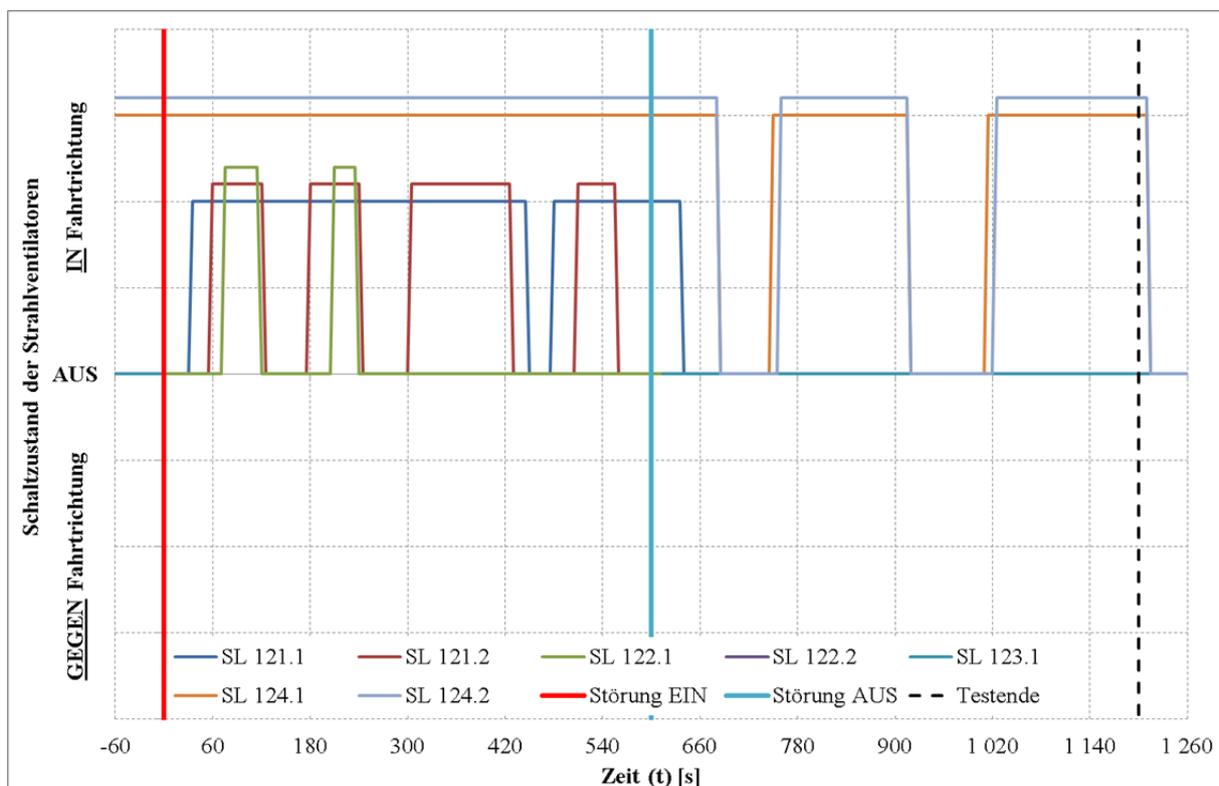


Abbildung 4-29: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellung ZIEGLER und NICHOLS

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Störverhalten bei der Reglereinstellung nach ZIEGER und NICHOLS eine gutes dynamisches Grundverhalten aufweist, welches durch den hohen Proportionalanteil jedoch (ähnlich wie beim Führungsverhalten) erhebliche Einschwingzeiten aufweist.

Die Schalthäufigkeit ist zudem so hoch, dass bei rein Netzbetriebenen Ventilatoren ohne Drehzahlregelung (je nach den Anlagenverhältnissen) die erhöhten Anlaufströme zum Fall von Leistungsschaltern führen können wenn keine entsprechenden Maßnahmen in der Ventilatorsteuerung vorgesehen sind.

#### 4.6.2.2 Parametrierung nach Chien, Hrones und Reswick (CHR)

##### 4.6.2.2.1 Optimierung für Störverhalten, aperiodischer Verlauf (kein Überschwingen)

Abbildung 3-1 zeigt den Verlauf der Regelgröße nach Auf- und Wertschaltung der Störgröße bei einer Reglereinstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert für Störverhalten und einen aperiodischen Verlauf ( $\ddot{u} = 0\%$ ):

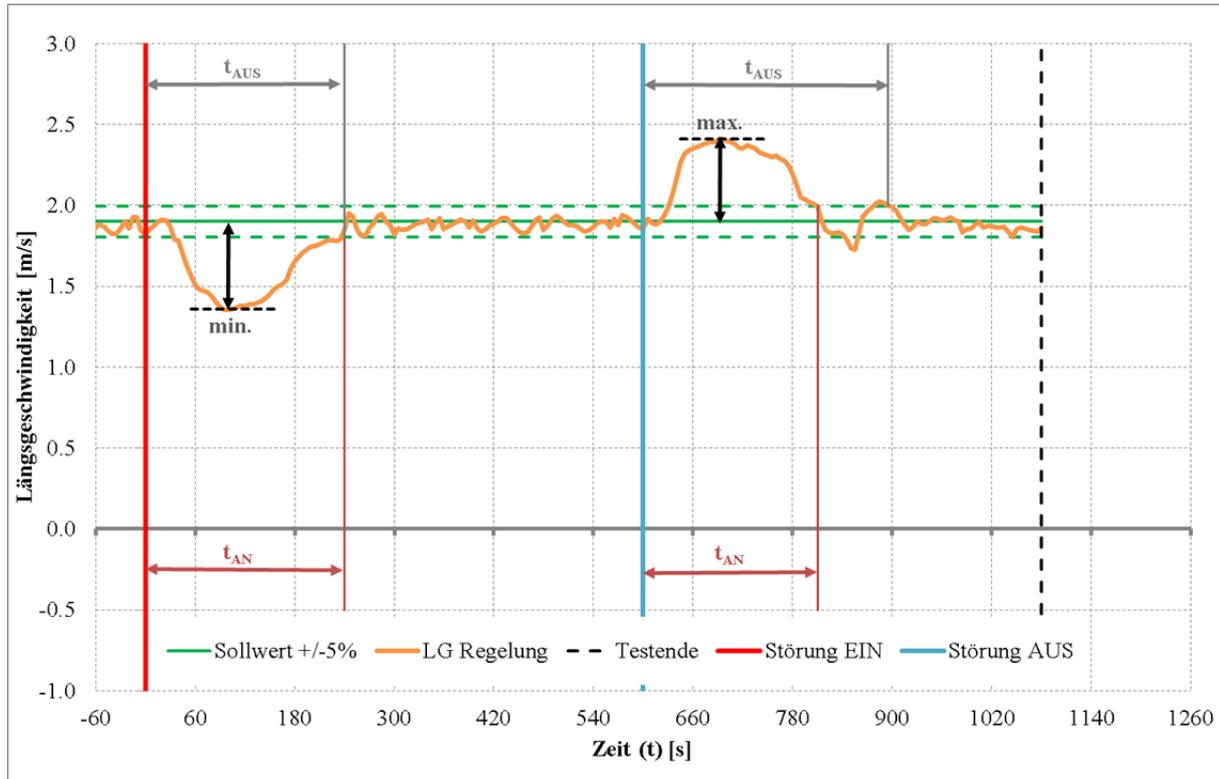


Abbildung 4-30: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt sowohl bei Auf- als auch bei Wertschaltung der Störgröße 29%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wertschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 240 bzw. 210 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wertschaltung der Störgröße) liegt bei 210 bzw. 295 Sekunden.

Tabelle 4-22: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. CHR (Störung, aperiod.)

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Störung, aperiod. - ( $K_p = 3,80 / T_N = 144,39$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wertschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
1,35 m/s (-29,0%)	240 s	240 s	2,45 m/s (+29,0 %)	210 s	295 s

Tabelle 4-22 enthält eine Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach CHIEN, HRONES und RESWICK optimiert für Störverhalten und aperiodischen Verlauf (kein Überspringen).

Das beobachtete dynamische Verhalten bei äußeren Störungen ist anfangs ähnlich dem, welches bei den Einstellungen gemäß ZIEGER und NICHOLS beobachtet werden konnte (Anregelzeiten) unterscheidet sich hinten hinaus jedoch deutlich durch ein wesentlich besseres Einschwingverhalten. Nach Aufschaltung der Störgröße wird der Toleranzkorridor nach erstmaligem Erreichen nicht mehr verlassen, sodass Anregel- und Ausregelzeit ident sind, das leichte Nachschwingen nach Wegschaltung der Störgröße ist wesentlich weniger ausgeprägt als bei ZIEGLER und NICHOLS.

Der Grund hierfür liegt bei dem, im Vergleich, deutlich kleineren  $K_p$  (3,8 zu 5,69) und ist auch an der Aufzeichnung der Schaltzustände (Abbildung 4-31) erkennbar:

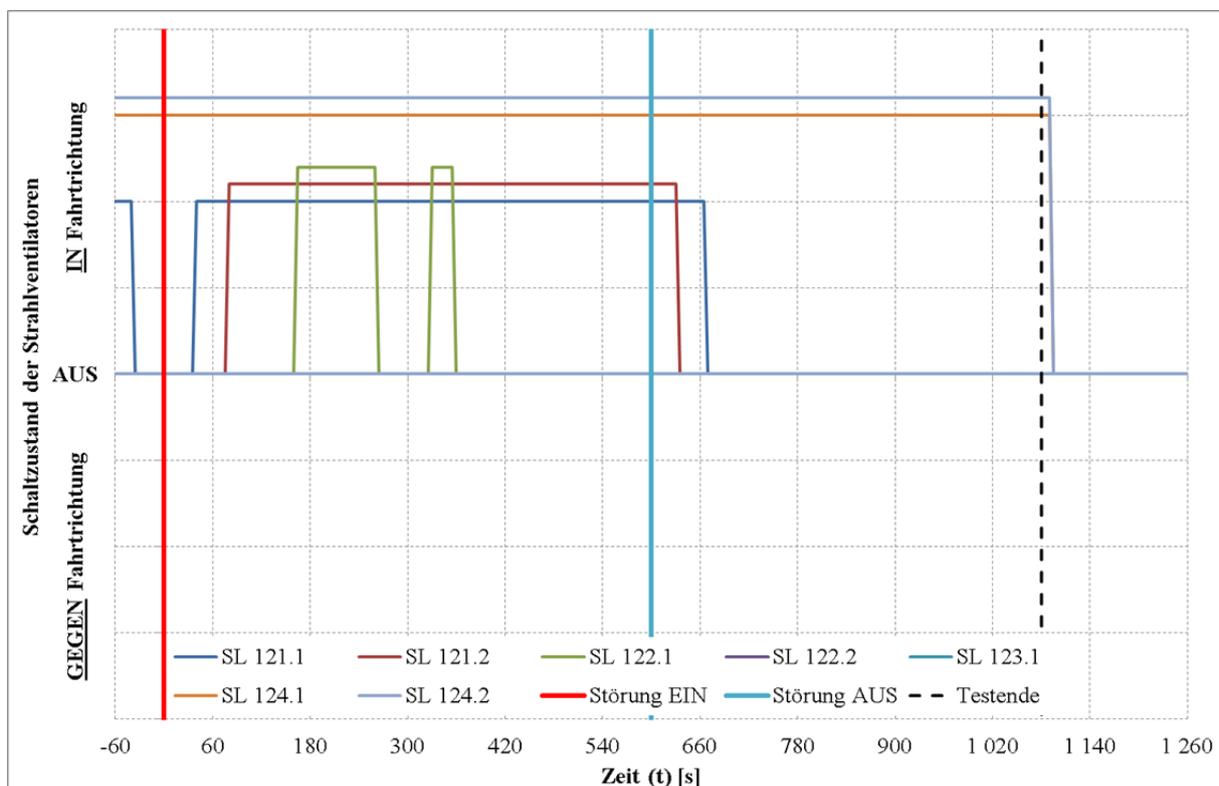


Abbildung 4-31: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellungen CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die anfängliche Zuschaltgeschwindigkeit ist ähnlich hoch wie bei ZIEGLER und NICHOLS, nimmt aber deutlich ab sobald die Regelgröße beginnt zu reagieren. Die Schalthäufigkeit ist dadurch erheblich niedriger als bei ZIEGLER und NICHOLS.

Zusammenfassend kann Dynamik und Charakteristik der Einstellungen als gut bezeichnet werden.

## 4.6.2.2.2 Optimierung für Führungsverhalten, begrenztes Überschwingen (20% Überschwingen)

In Abbildung 4-32 ist die Reaktion der Regelgröße auf eine äußere Störung bei Einstellung des Reglers gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert auf Störungsverhalten bei begrenztem Überschwingen (20% Überschwingen) dargestellt:

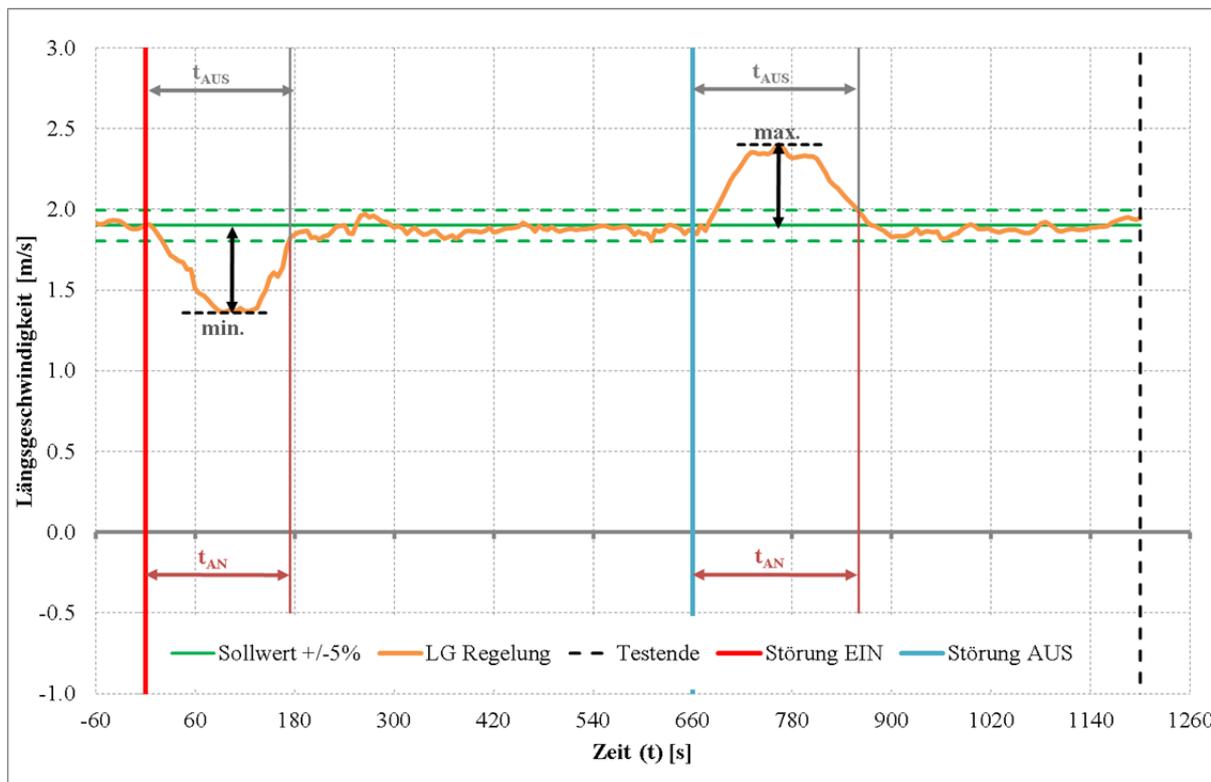


Abbildung 4-32: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt bei Aufschaltung der Störgröße -28,4%, bei Wegschaltung der Störgröße +26,3%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 175 bzw. 200 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße) ist in beiden Fällen ident mit der jeweiligen Anregelzeit.

Tabelle 4-23 enthält die Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach CHIEN, HRONES und RESWICK optimiert für Störverhalten und begrenztes Überschwingen ( $\ddot{u} = 20\%$ ):

Tabelle 4-23: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Störung, $\ddot{u} = 20\%$ - ( $K_P = 4,43 / T_N = 83,03$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wegschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
1,36 m/s (-28,4%)	175 s	175 s	2,40 m/s (+26,3 %)	200 s	200 s

Die ermittelten Kenngrößen zeigen ein, im Vergleich zu ZIEGLER und NICHOLS und CHIEN, HRONES und RESWICK (Störung, aperiod.), besseres dynamisches Verhalten. Dies betrifft nicht nur das anfängliche Verhalten nach Störung (Anregelzeit) sondern auch das Einschwingverhalten (Ausregelzeit). Da es nach erstem Wiedereintritt in den vereinbarten Toleranzbereich zu keinerlei feststellbarem Nachschwingen kommt ist sowohl bei Auf- als auch bei Wegschaltung der Störgröße die Ausregelzeit gleich der Anregelzeit.

Der Grund für das gute Störverhalten liegt im etwas höheren Proportionalwert  $K_P$  in Verbindung mit der kurzen Nachstellzeit  $T_N$ . Dies spiegelt sich auch in den Aufzeichnungen der Schaltzustände der Strahlventilatorne während des Tests wieder (siehe Abbildung 4-33):

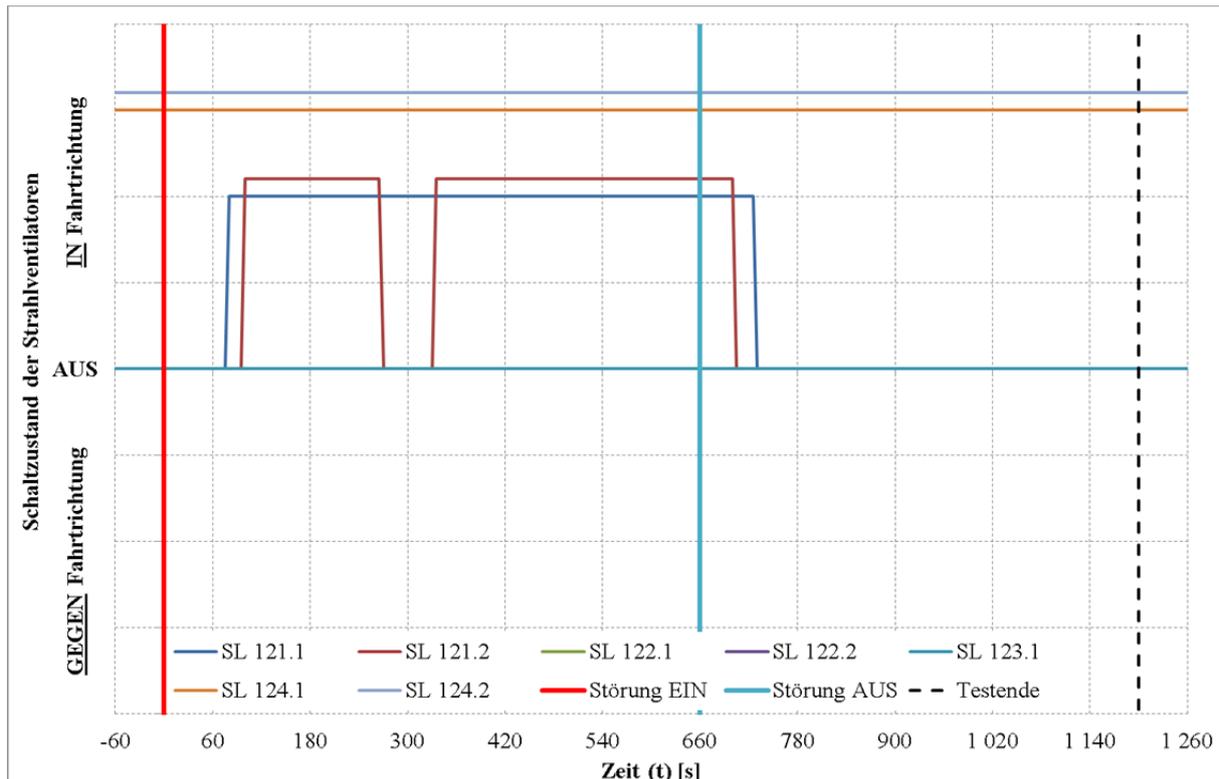


Abbildung 4-33: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Störung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die Zuschaltgeschwindigkeit ist, bedingt durch das gegenüber der Optimierung für Störung und aperiodischen Verlauf höhere  $K_P$  etwas schneller, die niedrige Nachstellzeit sorgt jedoch für einen schnelleren Gleichgewichtszustand zwischen Proportional- und Integralanteil und somit für eine rasche Stabilisierung des Reglers. Obwohl die Parameter eigentlich für ein begrenztes Überschwingen optimiert sind kann im vorliegenden Fall das Nachschwingen nach Aufprägung einer Störung zuverlässig vermieden werden.

Die Charakteristik des Störverhaltens der untersuchten Parameter kann insgesamt als sehr gut bezeichnet werden.

#### 4.6.2.2.3 Optimierung für Führungsverhalten, aperiodischer Verlauf (kein Überschwingen)

In Abbildung 4-34 ist die Reaktion der Regelgröße auf eine äußere Störung bei Einstellung des Reglers gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert auf Führungsverhalten bei aperiodischen Verlauf dargestellt:

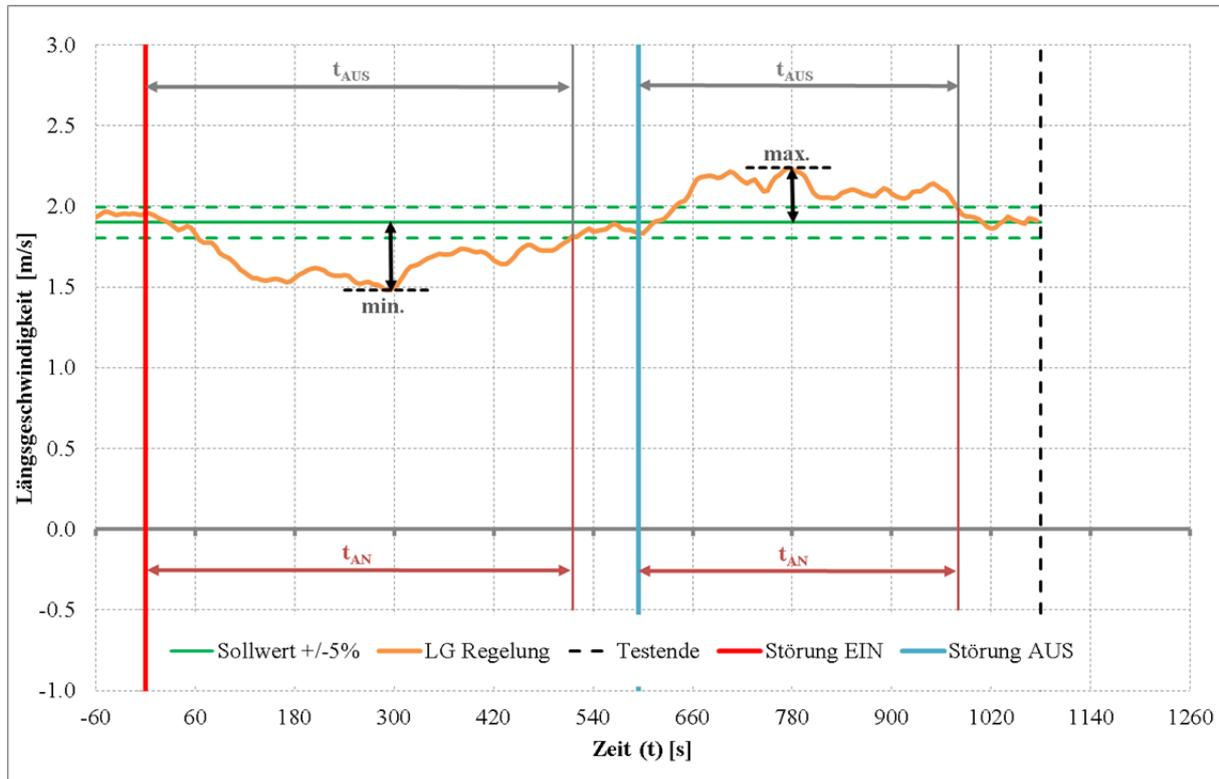


Abbildung 4-34: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Führung, aperiod.)

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt bei Aufschaltung der Störgröße -19,5%, bei Wegschaltung der Störgröße +16,31%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 515 bzw. 385 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße) ist in beiden Fällen ident mit der jeweiligen Anregelzeit.

Tabelle 4-24 enthält die Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach CHIEN, HRONES und RESWICK optimiert für Führungsverhalten und aperiodischen Verlauf (kein Überschwingen):

Tabelle 4-24: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. CHR (Führung, aperiod.)

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Führung, aperiod. - ( $K_P = 2,21 / T_N = 198,68$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wegschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
1,53 m/s (-19,5%)	515 s	515 s	2,21 m/s (+16,31 %)	385 s	385 s

Die Kenngrößen sprechen für eine schlechtere Dynamik bei äußeren Störungen. Die Wiederannäherung an den Sollwert nach störungsbedingter, vorübergehender Sollwertabweichung verläuft aperiodisch und erheblich langsamer als bei ZIEGLER und NICHOLS bzw. den beiden für Störverhalten optimierten Varianten gemäß CHIEN, HRONES und RESWICK.

Bedingt wird dies einerseits durch den deutlich kleineren Proportionalbeiwert  $K_P$  sowie durch eine, im Vergleich zu den übrigen Parametersätzen, extrem hohe Nachstellzeit  $T_N$ . Der Proportionalanteil des Reglers reagiert auf Grund des kleinen  $K_P$  zu schwach, gleichzeitig benötigt der Integralanteil zu lange um auf die anliegende Sollwertabweichung zu reagieren. Das Ergebnis ist eine trägere Reaktion auf die Störung von außen.

Dieses Verhalten ist auch sehr gut an Hand der aufgezeichneten Schalthandlungen während des Tests (siehe Abbildung 4-35) zu erkennen:

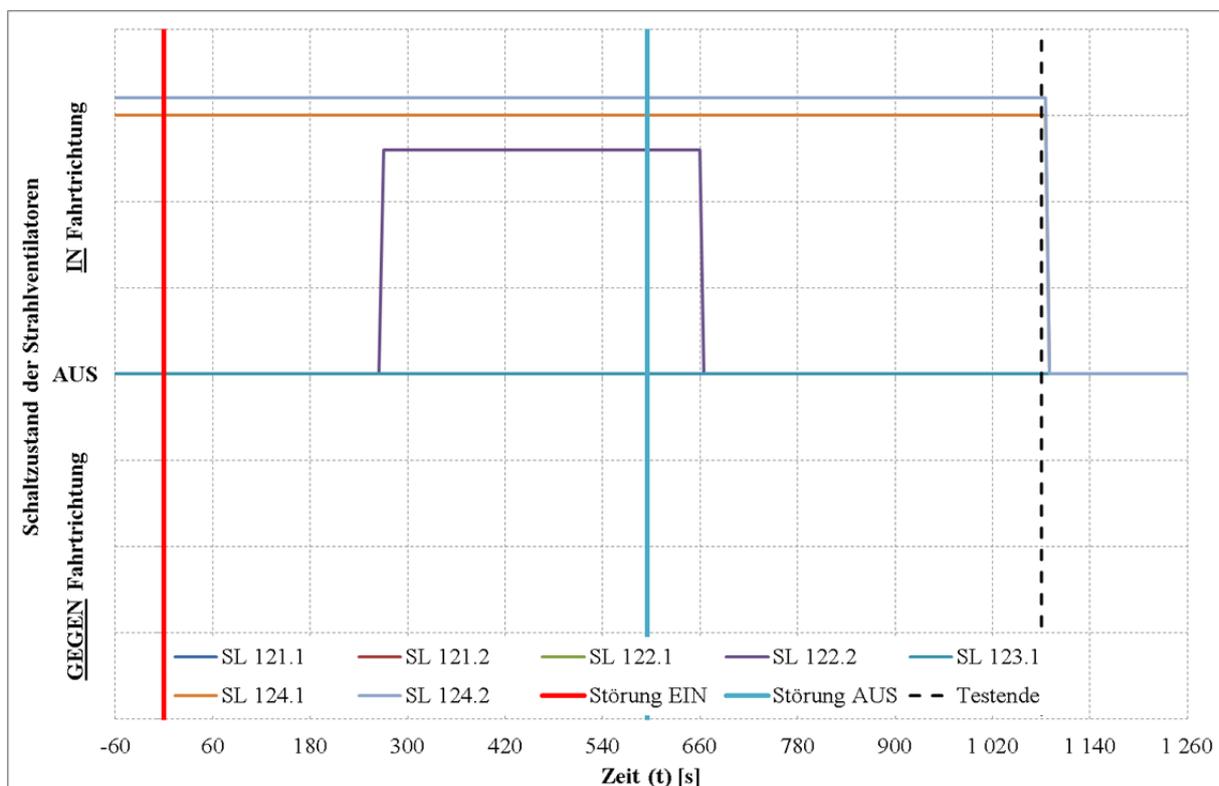


Abbildung 4-35: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Führung, aperiod.)

Die erste feststellbare Schalthandlung (mit Ausnahme der Anpassung der Drehzahl der beiden FU-gesteuerten Ventilatoren) erfolgte spät. Trotz weiterhin bestehender, vorübergehender Sollwertabweichung wird kein weiterer Ventilator angefordert, da der Regler insgesamt träge reagiert. Dies führt zu einer verzögerten und langsameren Reaktion auf die äußere Störung.

Die Charakteristik der Einstellungen kann somit insgesamt etwas träge und die Dynamik als eher gering eingestuft werden.

## 4.6.2.2.4 Optimierung für Führungsverhalten, begrenztes Überschwingen (20% Überschwingen)

Der zeitliche Verlauf der Regelgröße als Reaktion auf eine Störung von Außen bei einer Reglereinstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert für Führungsverhalten und begrenztest Überschwingen (20% Überschwingen) ist in Abbildung 4-36 dargestellt:

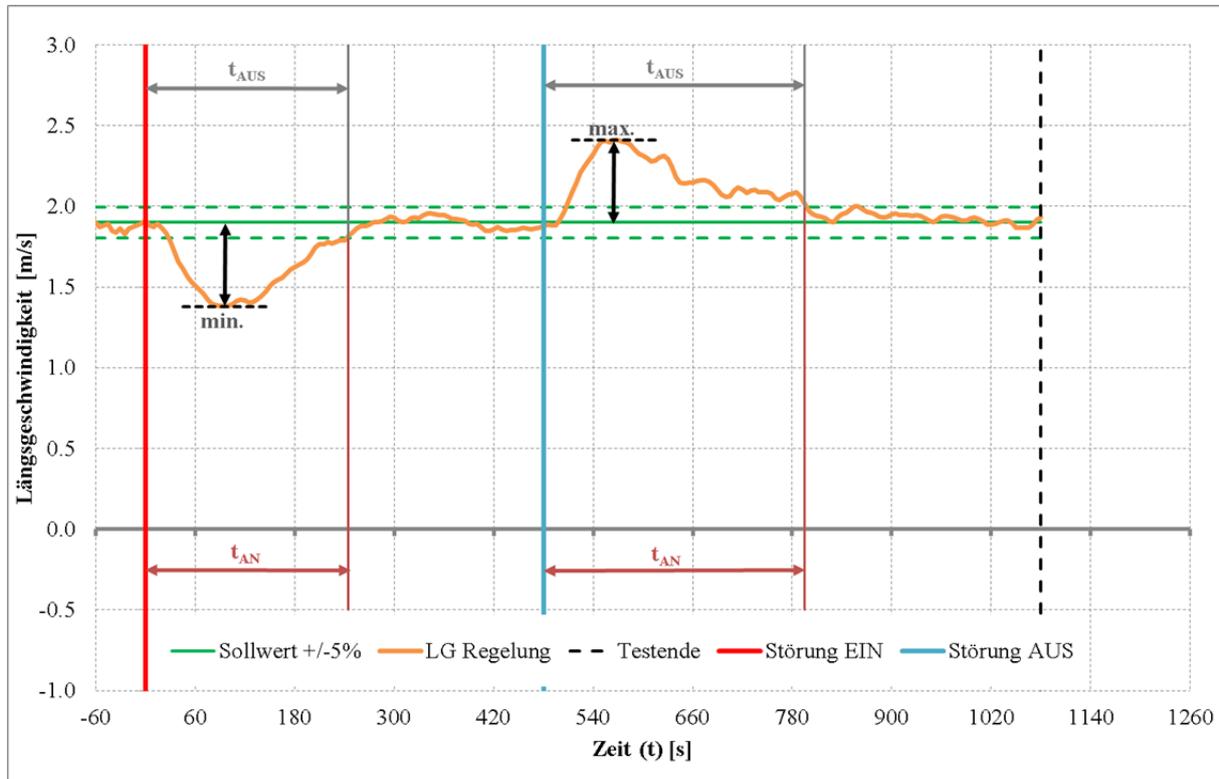


Abbildung 4-36: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt bei Aufschaltung der Störgröße -27,4%, bei Wegschaltung der Störgröße +26,8%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 245 bzw. 245 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wegschaltung der Störgröße) ist in beiden Fällen ident mit der jeweiligen Anregelzeit.

Tabelle 4-25 enthält die Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach CHIEN, HRONES und RESWICK optimiert für Führungsverhalten und begrenztes Überschwingen ( $\ddot{u} = 20\%$ ):

Tabelle 4-25: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Einstellung nach CHIEN, HRONES und RESWICK / Führung, $\ddot{u} = 20\%$ - ( $K_P = 3,80 / T_N = 165,57$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wegschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
1,38 m/s (-27,4%)	245 s	245 s	2,41 m/s (+26,8 %)	315 s	315 s

Die gewählten Einstellungen zeigen ein Verhalten das jenem bei Optimierung für Störverhalten und aperiodischen Verlauf (kein Überschwingen) sehr ähnlich ist. Die Reaktion auf die Störgröße erfolgt ebenso rasch, es ist jedoch keinerlei Nachschwingen zu beobachten. Die Kenngrößen liegen dabei ebenfalls in der Größenordnung des Parametersatzes für optimiertes Störverhalten und aperiodischem Verlauf.

Betrachtet man die Einstellwerte der beiden Parametersätze, wird auch der Grund hierfür klar ersichtlich. Die Proportionalbeiwerte sind mit 3,80 ident, die Nachstellzeiten weichen mit 144,39 und 165,57 nur leicht voneinander ab. Die im gegenständlichen Fall etwas höhere Nachstellzeit  $T_N$  bedingt jedoch etwas höhere Zeitkennwerte (An- und Ausregelzeit).

Dies ist auch an der Aufzeichnung der Schalthandlungen während des Tests (siehe Abbildung 4-37) klar erkennbar:

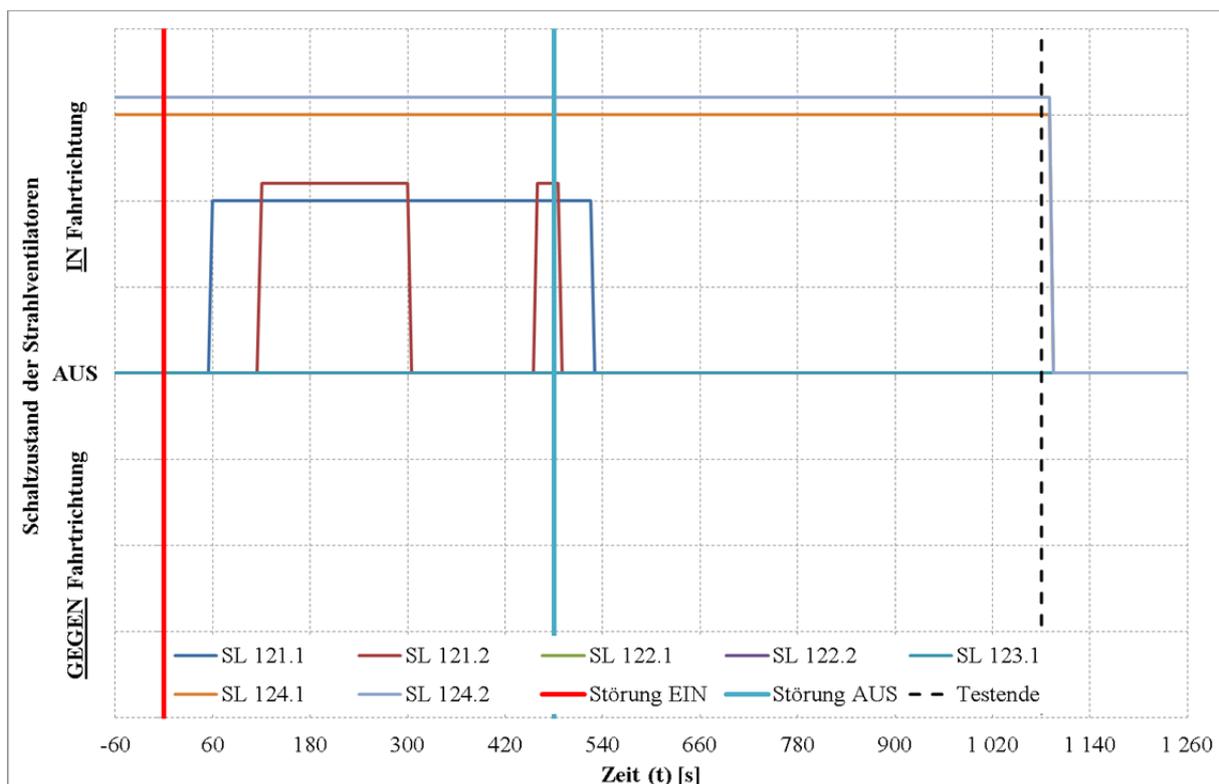


Abbildung 4-37: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellung CHR (Führung,  $\ddot{u} = 20\%$ )

Die Aufzeichnung zeigt eine mittelschnelle Zuschaltung der Ventilatoren mit geringer Schalthäufigkeit. Die Schaltdynamik ist jedoch erkennbar geringer als bei den Einstellungen für optimiertes Störverhalten und aperiodischen Verlauf.

Insgesamt kann die Charakteristik der Einstellwerte als gut aber etwas langsam eingeordnet werden.

### 4.6.2.3 Parametrierung nach Latzel

Abbildung 4-38 zeigt die Reaktion der Regelgröße auf äußere Störungen bei Einstellung des Reglers nach den Regeln von LATZEL für begrenztes Überschwingen (20% Überschwingen):

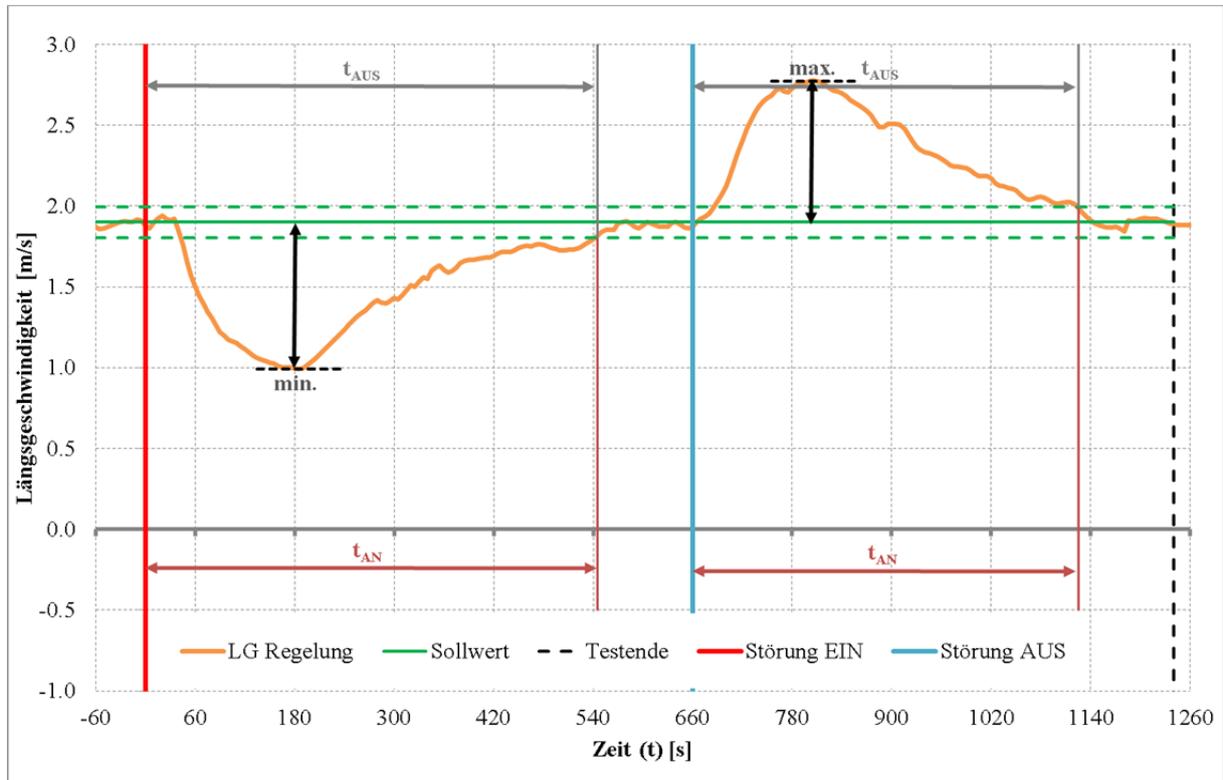


Abbildung 4-38: Störverhalten / Regelgröße, Einstellung LATZEL ( $\ddot{u} = 20\%$ )

Die maximale Überschwingweite nach Aufschaltung der Störung beträgt bei Aufschaltung der Störgröße -47,9%, bei Wagschaltung der Störgröße +45,8%.

Die Anregelzeit (Zeit nach Auf- bzw. Wagschaltung der Störgröße bis zum erstmaligen Wiedereintritt in den Toleranzbereich) liegt bei 545 bzw. 465 s, die Ausregelzeit (Zeitspanne bis zum dauerhaften Verbleib im Toleranzkorridor nach Auf- bzw. Wagschaltung der Störgröße) ist in beiden Fällen ident mit der jeweiligen Anregelzeit.

Tabelle 4-26 enthält die Zusammenfassung der ermittelten Kenngrößen zur Beurteilung des Störverhaltens bei einer Parametrierung des Reglers nach LATZEL optimiert begrenztes Überschwingen ( $\ddot{u} = 20\%$ ):

Tabelle 4-26: Kenngrößen Störverhalten, Parameter gem. LATZEL ( $\ddot{u} = 20\%$ )

Einstellung nach LATZEL, $\ddot{u} = 20\%$ - ( $K_P = 0,84 / T_N = 87,55$ )					
bei Aufschaltung der Störgröße			bei Wagschaltung der Störgröße		
Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$	Überschwingweite $\ddot{U}S$	Anregelzeit $t_{AN}$	Ausregelzeit $t_{AUS}$
0,99 m/s (-47,9%)	545 s	545 s	2,77 m/s (+45,8 %)	465 s	465 s

Die aus dem Verlauf der Regelgröße abgeleiteten Kenngrößen belegen das extrem träge Verhalten des Reglers bei der gewählten Einstellung. Die maximale Überschwingweite als Reaktion auf die plötzlich auftretende Störgröße ist deutlich größer als bei allen anderen bislang untersuchten Parametersätzen.

Durch die darauf folgende, ausgeprägte aperiodische Wiederannäherung an den Sollwert liegen An- und Ausregelzeit im vorliegenden Fall ebenfalls deutlich über jenen der anderen bisher getesteten Einstellungen.

Beides (hohe Überschwingweite, langsame An- und Ausregelzeit) ist bedingt durch das im Vergleich zu allen anderen Parametersätzen extrem kleine  $K_P$ . Dieses Verhalten zeigt sich auch bei Betrachtung der während des Tests aufgezeichneten Schalthandlungen (Abbildung 4-39):

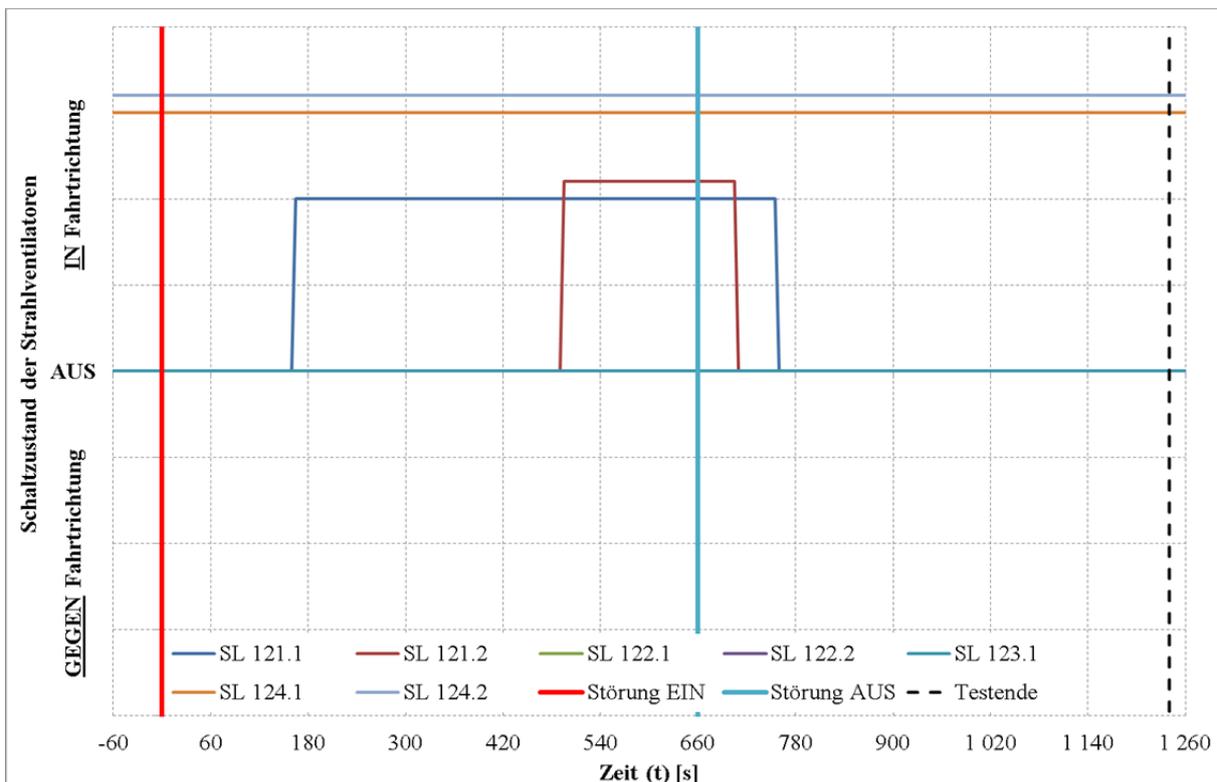


Abbildung 4-39: Störverhalten / Schaltzustände, Einstellung LATZEL ( $\ddot{u} = 20\%$ )

Die erste verzeichnete Schalthandlung (mit Ausnahme der Regelung der beiden FU-betriebenen Ventilatoren) erfolgt erst sehr spät, das gesamte Regelverhalten ist sehr träge. Die Schalthäufigkeit ist zwar sehr gering, dies allerdings voll zu Lasten der Regeldynamik.

Im Vergleich zu allen anderen betrachteten Einstellungen wird mit den Einstellwerten nach LATZEL mit Abstand das schlechteste Störverhalten erreicht.

### 4.6.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Insgesamt 6 unterschiedliche, aus der Literatur bekannte Einstellregeln für PI-Regler wurden bzgl. ihres Führungs- und Störverhaltens an der Lüftungsanlage eines realen Tunnels getestet.

Die Tests wurden bezüglich vergleichbarer Kenngrößen gemäß [DIN 19226-1 bis 6, 1994] ausgewertet und die Ergebnisse zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 4-27 enthält die zusammengefassten Ergebnisse für das Führungsverhalten in Form einer Beurteilungsmatrix:

Tabelle 4-27: Zusammenfassende Beurteilungsmatrix - Führungsverhalten

Führungsverhalten	ZIEGLER und NICHOLS	CHIEN, HRONES und RESWICK				LATZEL
		optimiert auf STÖRUNG		optimiert auf FÜHRUNG		
		aperiodisch	$\ddot{u} = 20\%$	aperiodisch	$\ddot{u} = 20\%$	
$K_P$	5,69	3,80	4,43	2,21	3,80	0,84
$T_N$	120,21	144,39	83,03	198,68	165,57	87,55
Zeitkennwert $t_{10\%}$	25 s	50 s	47,5 s	35 s	49 s	57,5 s
Zeitkennwert $t_{90\%}$	74 s	100 s	95 s	140 s	100 s	172 s
Anstiegszeit $AZ (t_{90\%} - t_{10\%})$	49 s	50 s	47,5 s	105 s	51 s	114,5 s
Überschwingweite $\ddot{U}S$	2,43 m/s (+27,89%)	1,99 m/s (+4,74%)	2,21 m/s (+16,32%)	1,90 m/s (+0,0%)	1,77 m/s (-6,84%)	2,13 m/s (+12,11%)
Anregelzeit $t_{AN}$	80 s	100 s	100 s	145 s	105 s	185 s
Ausregelzeit $t_{AUS}$	475 s	250 s	185 s	145 s	185 s	320 s

Das insgesamt beste Führungsverhalten weisen die Einstellungen nach CHIEN, HRONES und RESWICK auf. Insbesondere die beiden speziell auf Führungsverhalten optimierten Parametersätze liefern nahezu schwingungsfreie Ergebnisse mit ansprechenden An- und Ausregelzeiten. Die beiden auf Störung optimierten Einstellungen weisen jedoch ebenfalls eine recht gute Charakteristik mit vergleichbar gutem dynamischen Verhalten auf, die beobachteten Überschwingweiten liegen für den gegenständlichen Anwendungsfall einer Tunnellüftungsanlage im absolut tolerierbaren Bereich (deutlich unter 20%). Die beobachteten Schaltgeschwindigkeiten und -häufigkeiten können in Summe als moderat bezeichnet werden, womit auch eine Anwendung bei rein netzbetriebenen Strahlventilatoren zu keinen Problemen massiven Problemen führen sollte.

Die Einstellwerte nach ZIEGLER und NICHOLS führen zwar zu einem anfangs sehr guten dynamischen Verhalten und kurzer Anregelzeit, durch den hohen Proportionalbeiwert kommt es jedoch zu einem extrem ausgeprägten Einschwingvorgang mit hoher Überschwingweite und deutlich erhöhter Ausregelzeit. Die aufgezeichneten Schaltzustände zeigen eine sehr hohe Schaltgeschwindigkeit und -frequenz, was beim Betrieb von netzbetriebenen Strahlventilatoren ohne Drehzahlregelung sehr wahrscheinlich in vielen Fällen zu Problemen führen kann.

Die Werte nach LATZEL hingegen zeigen insgesamt ein eher träges Verhalten. An- und

Ausregelzeit sind gegenüber CHIEN, HRONES und RESWICK deutlich erhöht, die Charakteristik ist ausgeprägt aperiodisch. Trotzdem kommt es zu einem leichten Überschwingen das anschließend nur langsam abgebaut werden kann. Die beobachtete Schaltgeschwindigkeit und -frequenz sind jedoch sehr niedrig. Eine Anwendung dieser Parameter auch bei Anlagen mit Ventilatoren ohne Frequenzumrichter sollte somit kein Problem darstellen.

Tabelle 4-28 zeigt die Beurteilungsmatrix für die Ergebnisse des getesteten Störverhaltens:

Tabelle 4-28: Zusammenfassende Beurteilungsmatrix - Störverhalten

Störverhalten	ZIEGLER und NICHOLS	CHIEN, HRONES und RESWICK				LATZEL
		optimiert auf STÖRUNG		optimiert auf FÜHRUNG		
		aperiodisch	$\ddot{u} = 20\%$	aperiodisch	$\ddot{u} = 20\%$	
<b>K<sub>p</sub></b>	<b>5,69</b>	<b>3,80</b>	<b>4,43</b>	<b>2,21</b>	<b>3,80</b>	<b>0,84</b>
<b>T<sub>N</sub></b>	<b>120,21</b>	<b>144,39</b>	<b>83,03</b>	<b>198,68</b>	<b>165,57</b>	<b>87,55</b>
Überschwingweite ÜS	1,01 m/s (-46,84%)	1,35 m/s (-28,95%)	1,36 m/s (-28,42%)	1,53 m/s (-19,47%)	1,38 m/s (-27,37%)	0,99 m/s (-47,89%)
Anregelzeit $t_{AN}$	245 s	240 s	175 s	515 s	245 s	545 s
Ausregelzeit $t_{AUS}$	350 s	240 s	175 s	515 s	245 s	545 s
Überschwingweite ÜS	2,40 m/s (+26,32%)	2,45 m/s (+28,95%)	2,40 m/s (+26,32%)	2,24 m/s (+17,89%)	2,41 m/s (+26,84%)	2,77 m/s (+45,79%)
Anregelzeit $t_{AN}$	165 s	210 s	200 s	385 s	315 s	465 s
Ausregelzeit $t_{AUS}$	465 s	295 s	200 s	385 s	315 s	465 s

Auch hier liefern die Einstellungen nach CHIEN, HRONES und RESWICK in Summe die besten Ergebnisse, wobei die speziell auf Störverhalten optimierten beiden Varianten hervorstechen. In beiden Testfällen (Reaktion auf Auf- und Wegschaltung einer äußeren Störgröße) konnte hier die kürzesten An- und Ausregelzeiten und Überschwingweiten unter 30% erzielt werden. Obwohl eigentlich auf Führungsverhalten optimiert, lieferten allerdings auch die Einstellwerte, für Führungsverhalten bei begrenztem Überschwingen (20% Überschwingen) recht gute Ergebnisse. Einzig die Werte für Führung bei aperiodischem Verlauf führen zu deutlich erhöhten Zeitkennwerten und einem somit eher trägen Verhalten. Die beobachteten Schalthandlungen sind moderat, eine Anwendung auch bei Lüftungsanlagen mit ausschließlich netzbetriebenen Ventilatoren sollte somit ohne größere Probleme möglich sein.

Der Parametersatz nach ZIEGLER und NICHOLS zeigt eine ähnliche Charakteristik wie beim Führungsverhalten. Prinzipiell führen die Einstellungen zu einer guten Grunddynamik, insgesamt führt das nachfolgende Schwingen jedoch wieder zu einer deutlich erhöhten An- und Ausregelzeit. Zudem muss die Schaltfrequenz auch im Störfall als sehr hoch bezeichnet werden, was bei Ventilatoren ohne Drehzahlregelung in vielen Fällen zu Problemen führen kann.

Die Werte nach LATZEL liefern das insgesamt enttäuschendste Ergebnis. Hohe Überschwingweiten und extrem lange An- und Ausregelzeiten machen diese Einstellungen

für ein ansprechendes Störverhalten nahezu uninteressant. Die Schalthäufigkeit kann jedoch als niedrig bezeichnet werden, eine Anwendung der Parameter bei rein netzbetriebenen Anlagen sollte somit selbst bei empfindlichen Anlagenverhältnissen kein Problem darstellen.

Fasst man die Ergebnisse von Führungs- und Störverhalten zusammen, so kann man sagen, dass die Einstellwerte nach ZIEGLER und NICHOLS für Tunnellüftungsanlagen eigentlich nicht geeignet sind. Der Proportionalbeiwert  $K_P$  ist so hoch, dass zwar sowohl im Führungs- als auch im Störfall eine sehr schnelle Reaktion hervorgerufen wird, das Regelverhalten in Summe jedoch viel zu schnell für die Trägheiten der Regelstrecke sind. Die resultierenden Ein- bzw. Nachschwingvorgänge führen zu deutlich erhöhten Ausregel- bzw. Stabilisierungszeiten und zu einer sehr hohen Schalthäufigkeit. Ohne entsprechende Maßnahmen wird dadurch mehrmals zwischen Beschleunigung- und Bremsbetrieb gewechselt was in vielen Fällen (insbesondere bei Anlagen ohne drehzahlregelte Ventilatoren) zu erheblichen Problemen führt.

Die Einstellungen nach LATZEL können diesbezüglich zwar als vollkommen unproblematisch eingestuft werden (die Schalthäufigkeit ist sehr niedrig) was jedoch eindeutig zu Lasten des dynamischen Verhaltens des Reglers geht. Der Regler reagiert extrem träge, was insbesondere beim Störverhalten zu viel zu langen Ausregelzeiten führt. Die Zeiträume zum Erreichen der Lüftungsziele, welche in den meisten europäischen Richtlinien klar vorgegeben sind, können mit diesem Verhalten in den meisten Fällen nicht oder nur sehr schwer eingehalten werden.

CHIEN, HRONES und RESWICK liefern insgesamt Werte die durchwegs sowohl zu einem ansprechenden Führungs- als auch zu einem guten Störverhalten führen. Die von CHIEN; HRONES und RESWICK durchgeführten Optimierungen führen in der Regel genau zu dem Verhalten und dem Regelverlauf das beschrieben wird, wobei die jeweilige Optimierung meist nicht dazu führt dass das jeweilige Komplementärverhalten allzu negativ beeinflusst wird. Die erzielten An- und Ausregelzeiten sind in den meisten Fällen gut bis sehr gut, die Überschwingweiten (sofern überhaupt vorhanden) absolut tolerierbar. Die damit verbundenen Schalthäufigkeiten sollten auch eine Anwendung bei netzbetriebenen Ventilatoren ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass es sich bei Führungs- und Störverhalten prinzipiell um zwei konkurrierende Anforderungen handelt. Optimales Führungsverhalten geht bis zu einem gewissen Grad immer auf Kosten des Störverhaltens und umgekehrt. Ein für beide Anforderungen optimale Einstellung eines Reglers ist (zumindest ohne zusätzlichen, erheblichen regelungstechnischen Aufwand) de facto nicht möglich. Bei der Auswahl der geeignetsten Parameter gilt es daher abzuwägen, welche Charakteristika des Regelverhaltens hohe Priorität haben, und welche Nachteile im gegenständlichen Fall in Kauf genommen werden können.

Die für die Aufgabenstellung in Summe am besten geeigneten Einstellwerte liefern CHIEN, HRONES und RESWICK mit der Optimierung auf Störverhalten bei begrenztem Überschwingen (20% Überschwingen). Das dynamische Verhalten ist sehr gut, das Überschwingen mit etwas über 16% fällt leicht und kurz aus. Gleichzeitig konnten beim Störverhalten die besten Ergebnisse erzielt werden. Dieses Verhalten ist somit bestens für die Erstparametrierung einer Tunnellüftungsanlage geeignet.

## 4.7 Optimierungsmöglichkeiten

Wie im vorigen Kapitel aufgezeigt, liefern die Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert für Störverhalten bei begrenztem Überschwingen bereits gute Reglereinstellung für die Erstparametrierung welche bereits zu einem recht ansprechenden Führungs- und Störverhalten führen sollten.

Abhängig von den Anlagenverhältnissen kann es jedoch sein, dass die Ersteinstellung gemäß der beschriebenen Vorgehensweise zu einem noch nicht optimalen Regelverhalten führt. In diesem Fall können die Reglerparameter gegebenenfalls noch etwas angepasst werden.

Nach erfolgter Erstparametrierung gemäß Kapitel 4.6.3 wird ein Test bezüglich des Führungsverhaltens (Sprung des Sollwerts auf die im Brandfall gewünschte Längsgeschwindigkeit) durchgeführt. Dieser Test sollte (unabhängig vom Lüftungssystem) nach Möglichkeit für reine Längslüftung erfolgen, da die Ergebnisse bei Längslüftung in der Regel deutlicher und leichter interpretierbar sind. Zeigt die Regelgröße einen Verlauf wie in Abbildung 4-40, so sind die Einstellungen (das Führungsverhalten betreffend) bereits optimal gewählt, es sind keine weiteren Anpassungen erforderlich.

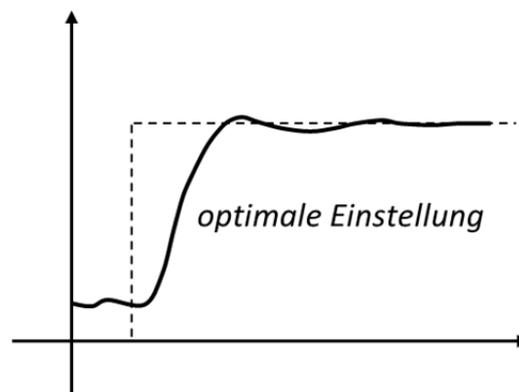


Abbildung 4-40: Verlauf der Regelgröße bei optimaler Einstellung; modifiziert nach [Honeywell International Inc., 2007]

Bei zu klein gewähltem Proportionalbeiwert  $K_P$  nimmt die Schwingungsneigung deutlich zu. Der Mittelwert der Regelgröße liegt während dieser Schwingungen jedoch eindeutig unterhalb des Sollwertes [Honeywell International Inc., 2007] (Abbildung 4-41, links). In diesem Fall ist der Proportionalbeiwert  $K_P$  schrittweise leicht zu erhöhen bis die Regelgröße den gewünschten Verlauf annimmt.

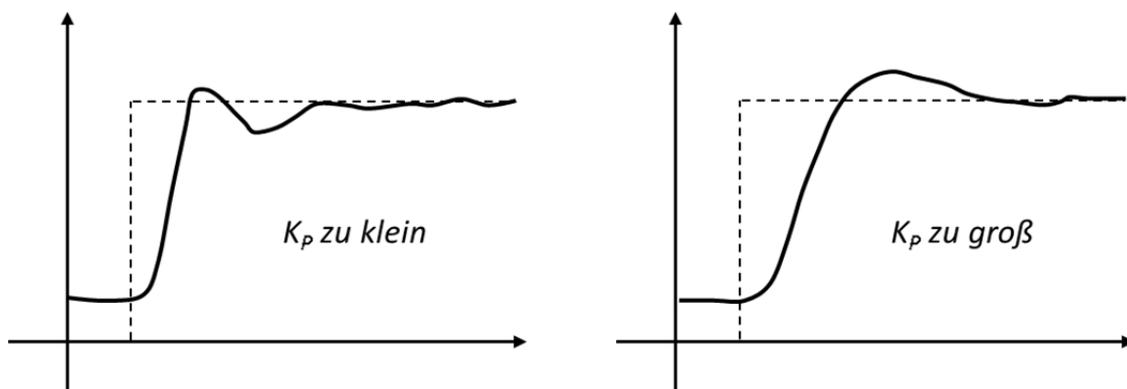


Abbildung 4-41: Verlauf der Regelgröße für unterschiedliches  $K_P$ ; modifiziert nach [Honeywell International Inc., 2007]

Ist der eingestellte Wert für den Proportionalbereich  $K_P$  zu groß, kommt es zu einem, in der Regel, einmaligen Überschwingen, da die Regelabweichung nicht schnell genug abgebaut werden kann [Honeywell International Inc., 2007] (Abbildung 4-41, rechts). Um das Überschwingen reduzieren oder gar eliminieren zu können, muss der Wert  $K_P$  sukzessive leicht reduziert werden.

Ähnliches Verhalten kann auch bei nicht optimal gewählter Nachstellzeit  $T_n$  beobachtet werden. Wurde sie zu klein gewählt, steigt die Schwingungsneigung ebenfalls, der Mittelwert der Regelgröße liegt währenddessen jedoch im Bereich des Sollwertes oder in manchen Fällen sogar etwas darüber [Honeywell International Inc., 2007] (Abbildung 4-42, links). Die Nachstellzeit  $T_n$  muss in diesem Fall nach und nach etwas reduziert werden, bis die Schwingungen abklingen.

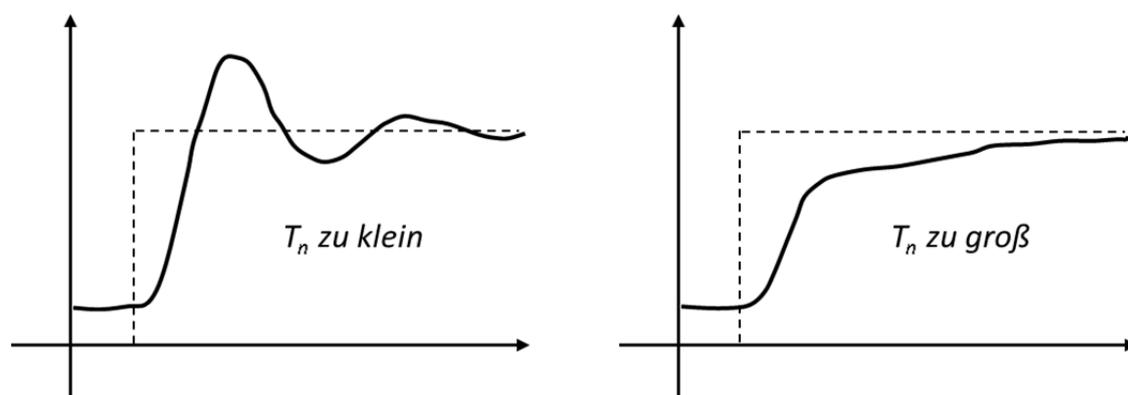


Abbildung 4-42: Verlauf der Regelgröße für unterschiedliche Nachstellzeiten  $T_n$ ; modifiziert nach [Honeywell International Inc., 2007]

Ist die Nachstellzeit hingegen zu groß gewählt, erfolgt die Aufsummierung der Regelabweichung im integralen Anteil des Reglers nicht schnell genug, wodurch es beim Übergang vom Proportional- in den Integralbereich dazu kommt, dass der Regelgrößenverlauf vorzeitig abflacht. Der Proportionalanteil liefert auf Grund der kleiner werdenden Regelabweichung keinen nennenswerten Beitrag mehr, wodurch das Ausregeln der verbleibende Regelabweichung fast ausschließlich über den integralen Anteil (und somit nur langsam) erfolgen kann [Honeywell International Inc., 2007] (Abbildung 4-42, rechts).

Anpassungen an den Reglerparametern (egal welcher Art) sollten niemals für beide Größen ( $K_P$  und  $T_n$ ) gleichzeitig und immer nur in kleinen Schritten erfolgen. Nach einer Anpassung sollte immer überprüft werden, ob die dadurch bedingten Änderungen im Regelverhalten in die gewünschte Richtung gehen. Muss einer der beiden Werte erheblich ( $>30\%$ ) gegenüber der Erstparametrierung verändert werden, um das gewünschte Verhalten erzielen zu können, sollte immer überprüft werden, ob dadurch eine Anpassung der jeweils anderen Kenngröße erforderlich wird.

Die hier angeführten Optimierungsansätze gelten in erster Linie für das Führungsverhalten. Für eine Optimierung des Störverhaltens kann jedoch ähnlich verfahren werden. Eine Erhöhung des Proportionalbeiwertes  $K_P$  führt zu einer stärkeren Reaktion des Reglers auf eine plötzliche äußere Störgröße (die Anregelzeit wird kürzer), ist der Wert jedoch zu groß, kann es zu einem Überschwingen kommen, wodurch sich die Ausregelzeit erheblich verlängern kann. Eine Verkürzung der Nachstellzeit kann das Störverhalten ebenfalls positiv beeinflussen.

Prinzipiell sind Führungs- und Störverhalten jedoch zwei konkurrierende Größen, eine Optimierung des einen geht immer zu Lasten des anderen. Die ‚optimale‘ Einstellung eines PI-Reglers stellt (ohne zusätzliche, jedoch meist recht aufwändige regelungstechnische Maßnahmen) somit immer einen Kompromiss dar.

## 4.8 Anwendung für unterschiedlichen Anlagentypen

Eine wesentliche Zielsetzung der gegenständlichen Untersuchungen ist es, ein allgemein anwendbares Prozedere für die Implementierung, Inbetriebnahme und Parametrierung von PI-Reglern zu finden, welches unabhängig vom vorliegenden Lüftungssystem oder Anlagentyp zum Einsatz kommen kann.

Aus diesem Grund wurden die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden an zwei gänzlich unterschiedlichen Lüftungsanlagen angewandt und getestet:

- Tunnel mit Längslüftung, Länge ca. 2000 m, Strahlventilatoren teilweise mit Drehzahlregelung ausgestattet
- Tunnel mit Querlüftung, Länge ca. 4500 m, Strahlventilatoren OHNE Drehzahlregelung

Eine Zusammenfassung der im Folgenden dargestellten Ergebnisse findet sich auch in [Schmölzer, Sturm, Zettl, Koppensteiner, & Wierer, 2016].

### 4.8.1 Tunnel mit Längslüftung und teilweise drehzahlgeregelten Strahlventilatoren

Der erste Tunnel an dem das beschriebene Verfahren angewendet wurde, ist die Richtungsfahrbahn Linz des Tunnels Neumarkt auf der S10 Mühlviertler Schnellstraße. Das Schema der Tunnellüftungsanlage ist in Abbildung 4-43 dargestellt:

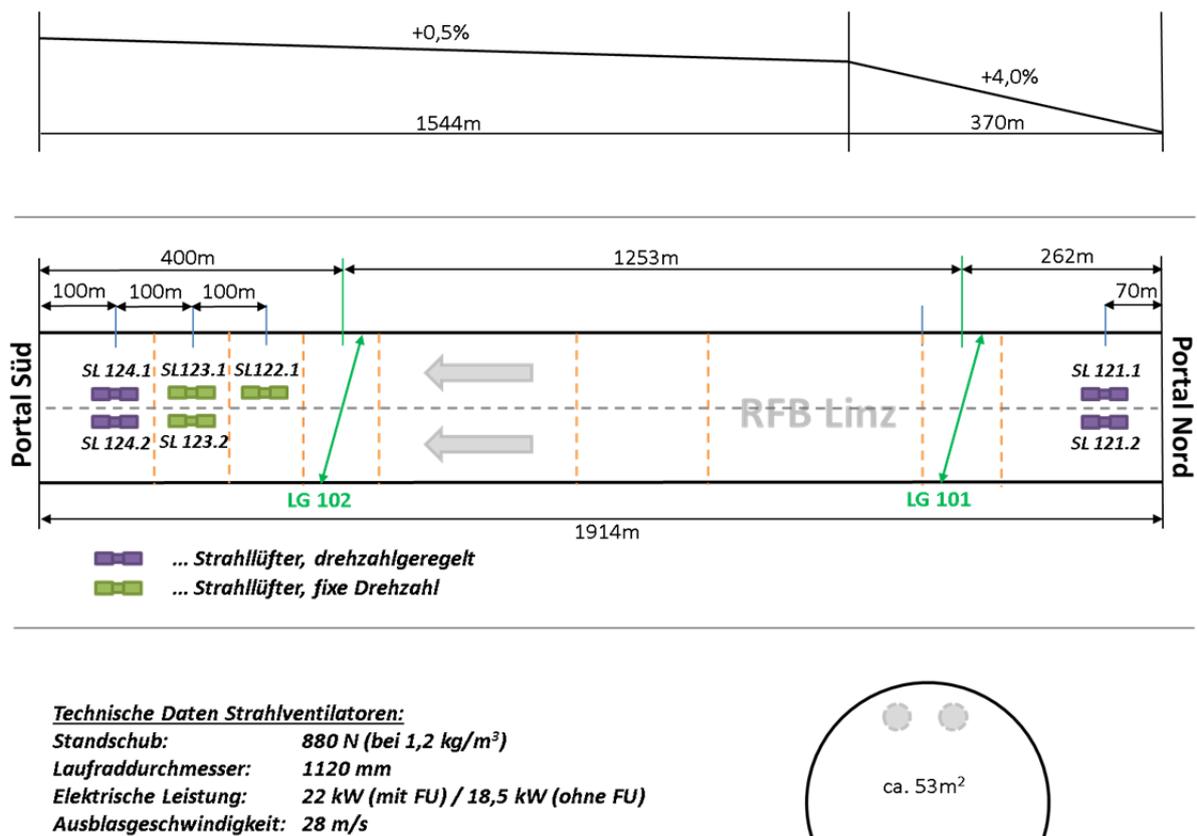


Abbildung 4-43: Anlagenschema Tunnel Neumarkt, RFB Linz

Es handelt sich dabei um einen ca. 2000 m langen, 2-streifigen Straßentunnel (Regelquerschnittsfläche ca. 53 m<sup>2</sup>) welcher im Richtungsverkehr geführt wird. Das Lüftungssystem ist als mechanische Längslüftung ausgeführt.

Die Röhre verfügt über insgesamt 7 Strahlventilatoren, die Anordnung ist (mit Ausnahme des Einzellüfters) paarweise unter der Tunnelfirste. Die beiden äußersten Ventilatorpaare (SL 124.1/2 und SL 121.1/2) verfügen über einen Frequenzumrichter (drehzahl geregelt), die übrigen Strahllüfter werden direkt geschaltet (fixe Drehzahl, ein/aus). Bei den Ventilatoren handelt es sich um vollreversible Lüfter mit jeweils 880 N Standschub (bezogen auf 1,2 kg/m<sup>3</sup>), eine Ausblasgeschwindigkeit von 28 m/s und einer elektrischen Leistung von 18,5 kw (netzbetrieb) bzw. 22,0 kW (FU-Betrieb).

Die Sprungantworten wurden bereits für die Durchführung der vergleichenden Tests zur Untersuchung unterschiedlicher Einstellregeln aufgezeichnet und mit Hilfe des Wendetangenten- und Zeitprozentkennwertverfahrens ausgewertet, diesbezüglich soll an dieser Stelle daher lediglich auf Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 verwiesen werden. Für die Erstparametrierung wurden die Mittelwerte der ermittelten Kenngrößen  $K_S$ ,  $T_u$  und  $T_g$  über beide Strömungsrichtungen herangezogen.

Die Erstparametrierung erfolgte, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus Kapitel 4.6.3, gemäß den Einstellregeln nach CHIEN; HRONES und RESWICK optimiert für Störungsverhalten bei begrenztem Überschwingen. Ein zusammenfassender Überblick über die resultierenden Einstellwerte ist in Tabelle 4-29 dargestellt:

Tabelle 4-29: Zusammenfassung Einstellwerte Tunnel Neumarkt / RFB Linz

<i>Regelverlauf mit 20% Überschwingen bei Störungssprung</i>		<i>Berechnungsformel [Lutz &amp; Wendt, 2014]</i>	<i>Resultierender Einstellwert</i>
<b>CHIEN, HRONES &amp; RESWICK</b>	<b><math>K_P</math></b>	$0,60 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	<b>4,43</b>
	<b><math>T_N</math></b>	$4,00 \cdot T_u$	<b>83,03</b>

Der Regler ist (siehe hierzu auch Kapitel 4.4.3) als PI-Regler mit Anti-Windup ausgeführt. Zusätzlich wurden die in Kapitel 4.4.4 erarbeiteten, begleitenden steuerungstechnischen Maßnahmen umgesetzt. In Tabelle 4-30 ist zusammengefasst, welche Maßnahmen umgesetzt wurden und welche Einstellungen gewählt wurden.

Tabelle 4-30: Überblick begleitende steuerungstechnische Maßnahmen, Tunnel Neumarkt

<b>Steuerungstechnische Maßnahmen, Tunnel Neumarkt</b>	<b>Ausgeführt (JA/NEIN), gewählte Einstellung</b>
<i>Dynamische Sättigungsgrenze für Anti-Windup</i>	JA / -
<i>Gleitende Mittelwertbildung Reglereingang</i>	JA / 5 Sekunden
<i>Totbandbreite</i>	+/- 0,0 m/s
<i>Schalthysterese</i>	JA / ±0,4
<i>Startverzögerung Regler</i>	NEIN

Die Sättigungsgrenze für das Anti-Windup wurde dynamisch ausgeführt, was bei Tunneln mit geringer Anzahl an installierten Strahlventilatoren (wie es in der RFB Linz des Tunnels Neumarkt der Fall ist) von besonderer Wichtigkeit ist. Des Weiteren wurde für den Reglereingang eine gleitende Mittelwertbildung von 5 Sekunden vorgesehen.



Minuten ab Auslösung der Brandzone zur Verfügung. Mit den gewählten Reglereinstellungen konnte dieses Ziel ( $1,5 \text{ m/s} \leq u \leq 2,0 \text{ m/s}$ ) bereits nach 95 s und somit knapp 1,5 Minuten (und ohne Überschwingen) erreicht werden. Das erzielte Führungsverhalten ist nahezu optimal, weitere Anpassungen der Reglerparameter sind daher nicht notwendig.

Da Führungs- und Störverhalten konkurrierende Größen darstellen und somit jede Optimierung zu Gunsten des Führungsverhaltens auch Auswirkungen auf das Störverhalten hat wurde, mit den bereits nachoptimierten Reglereinstellungen, das Störverhalten überprüft.

Die Vorgehensweise wurde gegenüber den bereits durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 4.6.2 nicht verändert: nachdem das Brandprogramm aktiviert wurde und sich die Strömungsgeschwindigkeit im Sollbereich stabilisiert hat, wurde ein Gegendruck mit Hilfe eines mobilen Axialventilators (2660 N Standschub) erzeugt. Die Auf- und Wegschaltung der Störgröße erfolgte sprunghaft. Der zeitliche Verlauf der Regelgröße bei äußerer Störung ist in Abbildung 4-45 dargestellt:

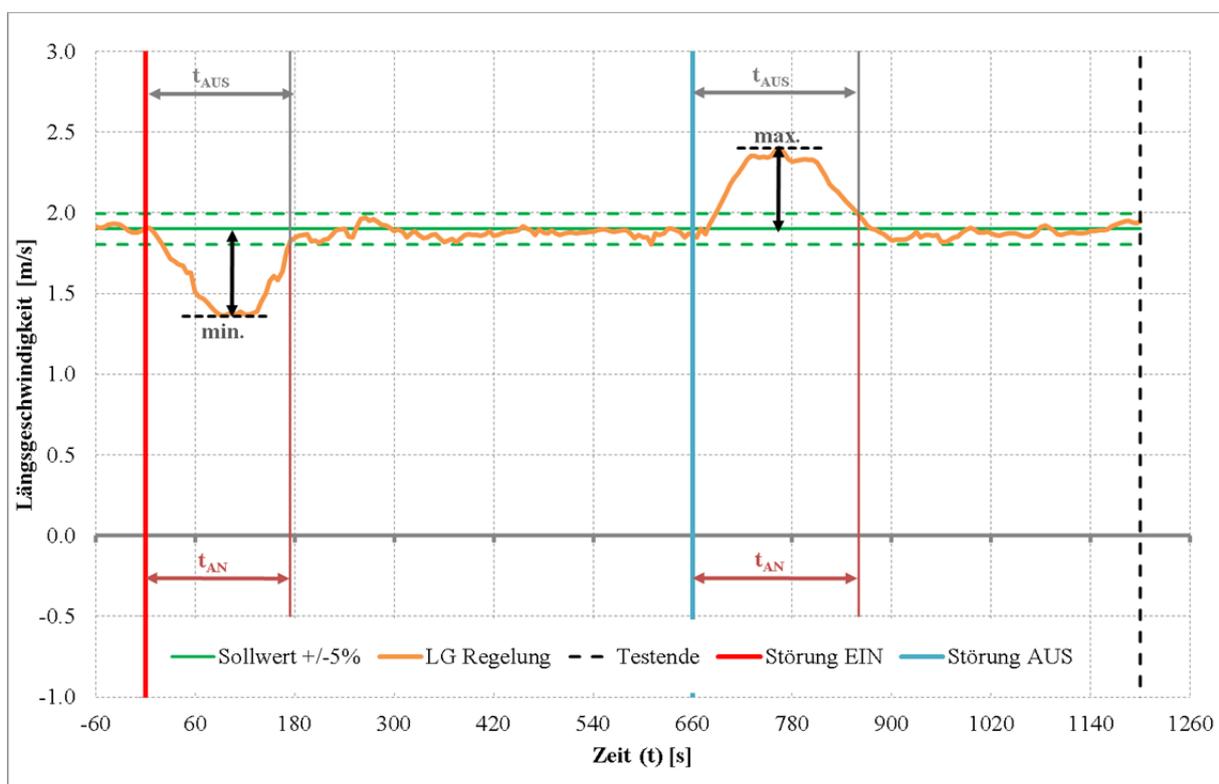


Abbildung 4-45: Störverhalten nach Optimierung, Tunnel Neumarkt (LL)

Die Überschwingweite beträgt  $-28\%$  bzw.  $+26\%$ , die erzielten Anregelzeiten betragen 175 s bei Auf- bzw. 200 s bei Wegschaltung der Störgröße. Da es weder beim Auf- noch beim Wegschalten der Störgröße zu einem Nachschwingen kommt entsprechen die Ausregelzeiten den Anregelzeiten.

Die österreichischen Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] machen keine Angaben bezüglich zulässiger, vorübergehender Regelabweichungen bzw. deren zulässiger Dauer im Störfall. Die gewählte Störgröße entspricht jedoch in etwa dem Doppelten des in der Auslegung der Lüftungsanlage berücksichtigten Stördrucks durch Wind. Unter diesen Umständen können Überschwingweiten unter  $30\%$  sowie Ausregelzeiten um 3 Minuten durchaus als sehr gut bezeichnet werden.

Weitere Anpassungen der Reglerparameter sind somit nicht erforderlich, die Einstellungen liefern sowohl ein ansprechendes Führungs- als auch Störverhalten.

#### 4.8.2 Tunnel mit Ablufthalbquerlüftung und netzbetriebenen Ventilatoren

Der zweite Tunnel an dem das Verfahren getestet und das Regelverhalten untersucht wurde, ist der Tunnel Götschka (Richtungsfahrbahn Prag), welcher ebenfalls auf der S10 Mühlviertler Schnellstraße liegt. Das Anlagenschema kann Abbildung 4-46 entnommen werden:

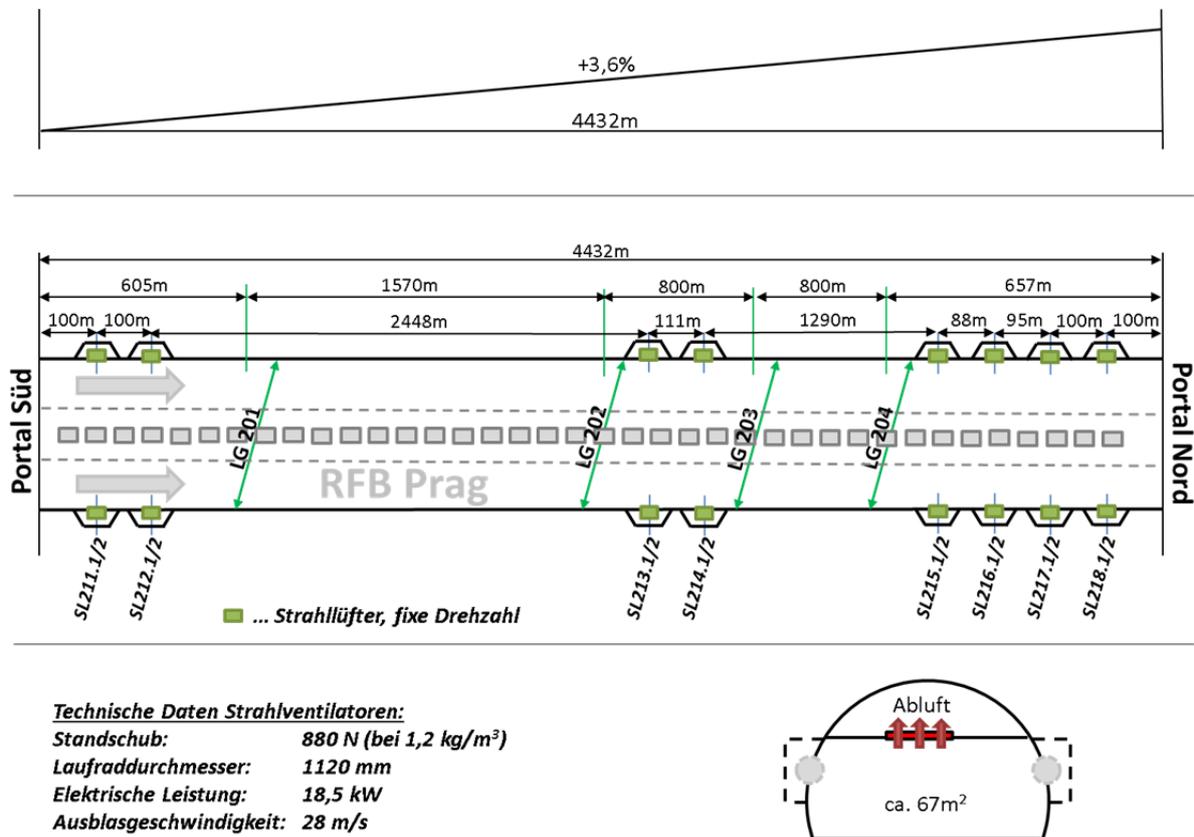


Abbildung 4-46: Anlagenschema Tunnel Götschka, RFB Prag

Beim Tunnel Götschka handelt es sich um einen ca. 4500 m langen, 3-streifigen Tunnel (Regelquerschnitt ca. 67 m<sup>2</sup>) welcher ebenfalls im Richtungsverkehr geführt wird. Das Lüftungssystem ist als Ablufthalbquerlüftung konzipiert. Die Absaugmenge im Brandfall erfolgt über 2 Axialventilatoren welche an den beiden Portalen stationiert sind und beträgt ca. 250 m<sup>3</sup>/s, die Regelung der Zuströmung zur Absaugstelle erfolgt über insgesamt 16 Strahlventilatoren, welche in seitlichen Nischen unterhalb der Zwischendecke installiert sind. Bei den Ventilatoren handelt es sich um vollreversible Lüfter mit jeweils 880 N Stand Schub (bezogen auf 1,2 kg/m<sup>3</sup>). Alle Strahlventilatoren werden direkt geschaltet (fixe Drehzahl, ein/aus) und verfügen über keinen Frequenzumrichter.

Der Tunnel Götschka weist somit gegenüber dem bisher untersuchten Tunnel Neumarkt einige wesentliche Unterschiede auf:

- Ablufthalbquerlüftung mit außerordentlich hoher Absaugmenge
- Strahlventilatoren können NICHT drehzahl geregelt werden
- Deutlich größere Tunnellänge / Regelquerschnitte

Durch die Absaugung in Verbindung mit dem merklich größeren Regelquerschnitt ist in dem darüberhinaus mehr als doppelt so langen Tunnel daher mit erheblich größeren Trägheiten in der Regelstrecke zu rechnen.

Analog zum Tunnel Neumarkt wurden auch für den Tunnel Götschka die Sprungantworten der Tunnellüftung für beiden Strömungsrichtungen aufgezeichnet und mit Hilfe der Zeitprozentkennwertmethode ausgewertet:

Tabelle 4-31: Kenngrößen aus Streckenidentifikation Tunnel Götschka- Mittelwertbildung

Sprungantwort	$K_S$	$T_u$	$T_g$	$T_s$
<i>IN Fahrtrichtung</i>	0,1950	31,66	145,23	39,31
<i>GEGEN Fahrtrichtung</i>	0,3563	79,27	248,24	55,62
<b>Mittelwert</b>	<b>0,2756</b>	<b>55,47</b>	<b>196,73</b>	<b>47,47</b>

Die Erstparametrierung erfolgte auch hier gemäß den Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert für Störverhalten bei gengrenztem Überschwingen. Für die Berechnung der Einstellwerte wurden wiederum die Mittelwerte der relevanten Kenngrößen ( $K_S$ ,  $T_u$  und  $T_g$ ) über beide Strömungsrichtungen herangezogen, um eine möglichst neutrale (von äußeren Einflüssen während der Messungen unbeeinflusste) Grundauslegung des Reglers zu erhalten:

Tabelle 4-32: Zusammenfassung Einstellwerte Tunnel Götschka / RFB Prag

<i>Regelverlauf mit 20% Überschwingen bei Störungssprung</i>		<i>Berechnungsformel</i>	<i>Resultierender Einstellwert</i>
<b>CHIEN, HRONES &amp; RESWICK</b>	$K_P$	$0,60 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	<b>9,01</b>
	$T_N$	$4,00 \cdot T_u$	<b>127,58</b>

Der eingesetzte Regler ist ident zu jenem im Tunnel Neumarkt (siehe hierzu auch Kapitel 4.4.4), Tabelle 4-33 enthält zudem eine Übersicht über die beim Tunnel Götschka ausgeführten, begleitenden steuerungstechnischen Maßnahmen sowie die dafür gewählten Einstellungen:

Tabelle 4-33: Überblick begleitende steuerungstechnische Maßnahmen, Tunnel Götschka

Steuerungstechnische Maßnahmen, Tunnel Götschka	Ausgeführt (JA/NEIN), gewählte Einstellung
<i>Dynamische Sättigungsgrenze für Anti-Windup</i>	JA / -
<i>Gleitende Mittelwertbildung Reglereingang</i>	JA / 5 Sekunden
<i>Totbandbreite</i>	+/- 0,0 m/s
<i>Schalthyserese</i>	JA / ±0,9
<i>Startverzögerung Regler</i>	JA / 50 Sekunden

Dynamische Sättigungsgrenze für das Anti-Windup, gleitende Mittelwertbildungen am Reglereingang (5 Sekunden) und Breite des Totbands ( $\pm 0,0$  m/s) wurden analog zum Tunnel Neumarkt ausgeführt. Da der Tunnel Götschka jedoch, im Gegensatz zum Tunnel Neumarkt, ausschließlich über netzgesteuerte Strahlventilatoren (OHNE Möglichkeit der Drehzahlregelung) verfügt und der Standschub der einzelnen Ventilatoren relativ groß ist, wurde die Schalthysterese zur Reduktion der Schalthäufigkeiten mit  $\pm 0,9$  deutlich höher angesetzt. Da es sich um ein System mit Absaugung handelt wurde zudem eine Startverzögerung des umgesetzt. Diese wurde in Form eines fixen, parametrierbaren Verzögerungsgliedes ausgeführt und auf Basis mehrerer Versuche mit 50 Sekunden eingestellt.

Auch für den Tunnel Götschka wurde in einem ersten Schritt das Führungsverhalten nach erfolgter Erstparametrierung bei reiner Längslüftung (OHNE Absaugung) getestet, das Ergebnis ist Abbildung 4-47 dargestellt (violett-strichlierte Linie). Der Grund hierfür liegt darin, dass die Aussagekraft des Tests bei reiner Längslüftung wesentlich größer ist. Ob ein Nachoptimierungsbedarf vorhanden ist und welche Parameter anzupassen sind kann bei Längslüftung leichter und klarer festgestellt werden als bei aktiver Absaugung.

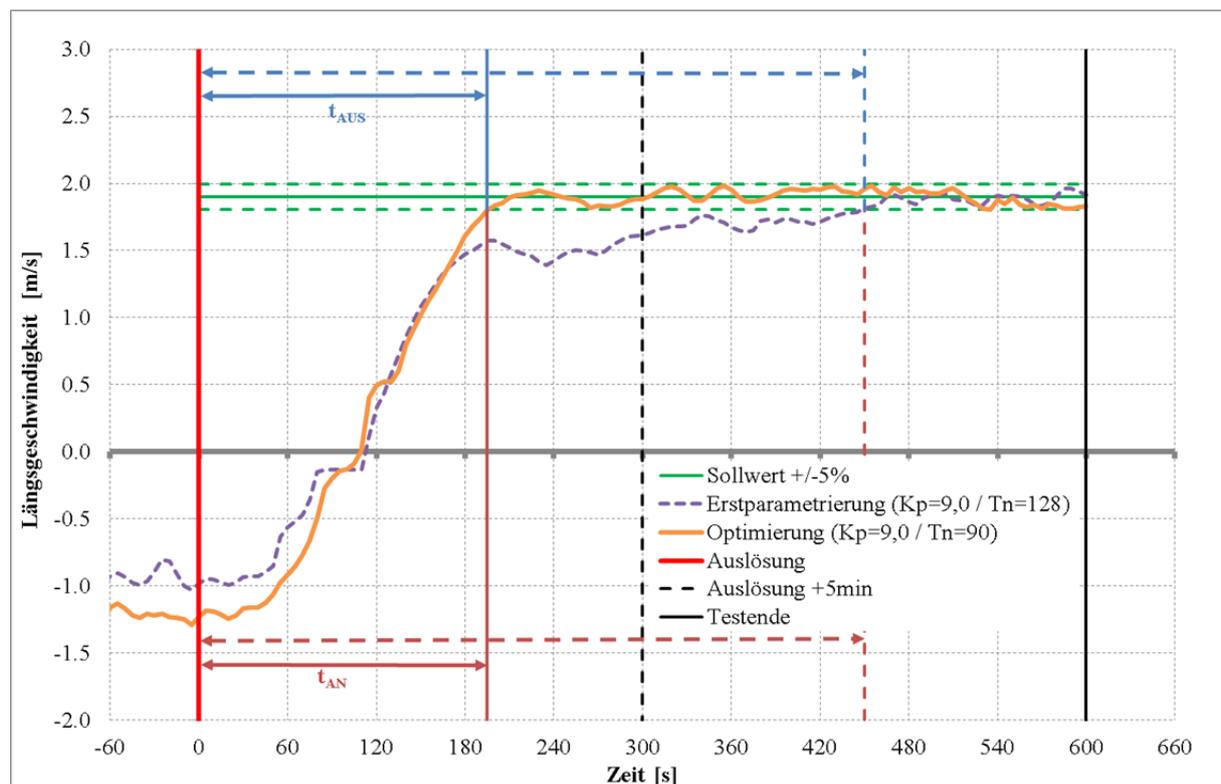


Abbildung 4-47: Führungsverhalten Erstparametrierung/Optimierung, Tunnel Götschka (LL)

Das anfängliche dynamische Verhalten ist sehr gut, nach ca. 180 s konnte trotz der stark negativen Grundströmung eine Längsgeschwindigkeit von  $+1,5$  m/s erreicht werden. Danach kommt es jedoch zu einer merkbaren Abflachung bei der weiteren Annäherung an den Sollwert. Die An- und Ausregelzeit ist mit 450 s daher sehr lange.

Eine Abflachung des Regelgrößenverlaufs vor Erreichen des Sollwertes deutet auf eine etwas zu hohe Nachstellzeit  $T_n$  hin (siehe Kapitel 4.7). Um diesen Effekt reduzieren oder gar vermeiden zu können wurde die Nachstellzeit  $T_n$  daher von ursprünglich 128 s auf 90 s reduziert und der Test wiederholt. Das Ergebnis des Tests mit den nachoptimierten

Parametern ist ebenfalls in Abbildung 4-47 dargestellt (orange Linie). Die gute Anfangsdynamik konnte trotz der Anpassungen erhalten bleiben, die Abflachung jedoch gleichzeitig komplett beseitigt werden. Es kommt auch zu keinerlei Überschwingen, die An- und Ausregelzeit liegt dadurch nur mehr bei 195 s (etwas mehr als 3 Minuten). Gemäß [RVS 09.02.31, 2014] stehen bei reiner Längslüftung insgesamt 5 Minuten zur Erreichung der Lüftungsziele (Längsgeschwindigkeit zwischen 1,5 und 2,0 m/s) zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der starken Grundströmung entgegen der Entlüftungsrichtung und der Trägheiten eines 4,5 km langen Tunnels mit einem Regelquerschnitt von 67 m<sup>2</sup> kann dieses Verhalten somit als sehr gut bezeichnet werden.

Da es sich beim Tunnel Götschka eigentlich um einen Tunnel mit Ablufthalbquerlüftung handelt, wurde mit den an Hand der Längslüftung bereits optimierten Parametern auch das Führungsverhalten bei Absaugbetrieb getestet. Die Absaugstelle wurde dabei so gewählt, dass möglichst ungünstige Startbedingungen vorherrschen (portalnahe Absaugung mit natürlicher Grundströmung welche die Strömung im kurzen Tunnelast unterstützt). Das Ergebnis dieses Tests ist in Abbildung 4-48 dargestellt:

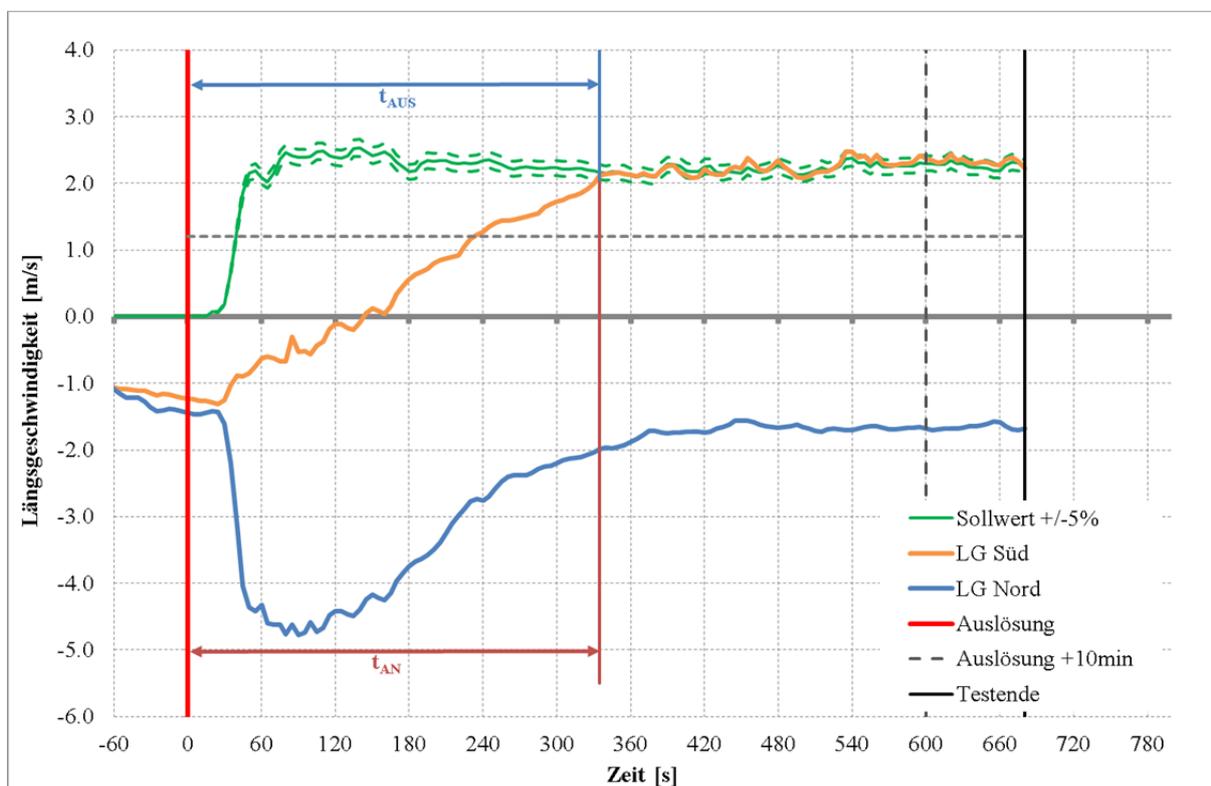


Abbildung 4-48: Führungsverhalten nach Optimierung, Tunnel Götschka (HQL)

Die Anregelzeit beträgt 335 s (ca. 5,5 Minuten). Es konnte zudem kein Über- oder Unterschwingen beobachtet werden, womit die Anregelzeit auch der Ausregelzeit entspricht. Die Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] sehen für Quergelüftete Anlagen eine Zeitspanne von 10 Minuten ab Auslösung der Brandzone vor, innerhalb derer die Lüftungsziele (beiseitige Zuströmung zum Brandort, bei Richtungsverkehr zudem eine Mindestzuströmung in Fahrtrichtung von 1,2 m/s / nach Möglichkeit soll die Zuströmung in Fahrtrichtung zudem etwas höher sein als entgegen der Fahrtrichtung) erreicht werden müssen. Die erzielte Anregelzeit kann somit als sehr gut eingestuft werden.

Sehr gut erkennbar ist zudem, warum (wie bereits in Kapitel 4.4.4 angeführt) bei Systemen

mit Absaugung unbedingt eine Startverzögerung für den Regler erforderlich ist. Die ersten 30 Sekunden nach Auslösung des Brandprogramms (rote Linie) passiert gar nichts, da die Abluftklappen geöffnet bzw. geschlossen werden müssen und die Abluftventilatoren gestartet und hochgefahren werden müssen. Anschließend dauert es noch einmal fast 30 Sekunden bis sich die resultierende Strömung in den beiden Tunnelästen aufbauen kann. In diesen insgesamt fast 60 Sekunden würde der Regler (sofern er unmittelbar nach Brandauslösung startet) auf einen falschen Sollwert regeln, woraus eine anfänglich falsche Ventilatorschaltung und in weiterer Folge, auf Grund der integrierenden Eigenschaften des PI-Reglers, eine längerfristige Verfälschung der Stellgröße resultieren können.

Abschließend muss selbstverständlich auch noch das Störverhalten für die bereits optimierte Reglereinstellung überprüft werden. Als äußere Störgröße dienten insgesamt 4 der 16 installierten Strahlventilatoren im Tunnel (insgesamt somit ca. 3520 N Standschub), welche aus der Regelung herausgenommen und vorübergehend separat manuell schaltbar gemacht wurden. Dieser Test wurde bei laufendem Brandprogramm nach stabilem Erreichen des Sollwertes durchgeführt (eingeschwungener Zustand), in dem die Störgröße (4 Strahlventilatoren) sprunghaft dagegen- und nach erneuter Stabilisierung der Regelgröße wieder weggeschaltet wurden. Das Ergebnis dieses Tests ist in Abbildung 4-49 dargestellt:

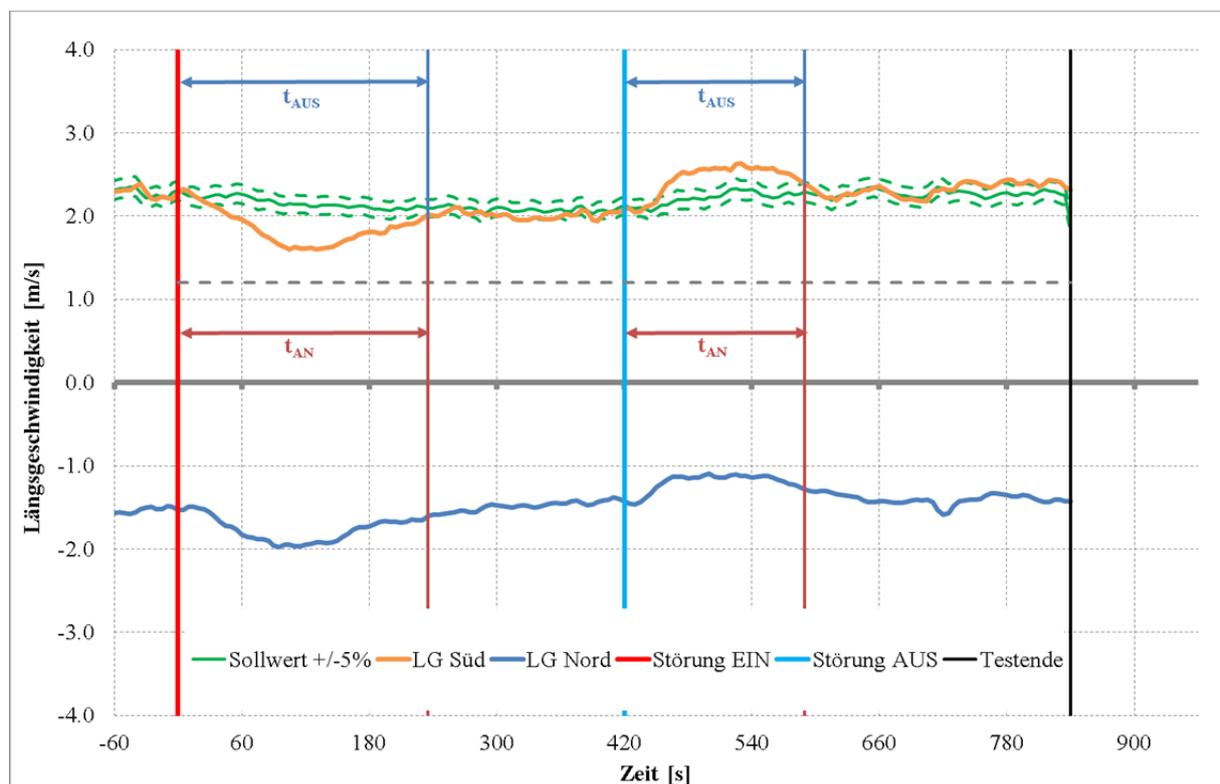


Abbildung 4-49: Störverhalten nach Optimierung, Tunnel Götschka (HQL)

Die erzielten An- bzw. Ausregelzeiten betragen 235 s (bei Aufschaltung) bzw. 170 s (bei Wegschaltung). Die beobachtete Überschwingweite liegt bei -25% bzw. +18%.

In den einschlägigen Richtlinien wie z.B. der [RVS 09.02.31, 2014] werden keine Vorgaben bezüglich des Störverhaltens eines Regler gemacht, das gegenständliche Regelverhalten bei Störung kann jedoch auf jeden Fall als sehr ansprechend für ein träges System, wie es eine Ablufthalbquerlüftung darstellt, bezeichnet werden.

Insgesamt besteht somit keine weitere Notwendigkeit die Reglerparameter anzupassen.

## 4.9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Regelung der Längsgeschwindigkeit im Tunnel ist von enormer Wichtigkeit um optimale Flucht- und Sichtbedingungen ermöglichen zu können. Aus diesem Grund zählen geschlossene Regelkreise heute zum Stand der Technik und im Laufe der Zeit wurden für diesen speziellen Anwendungsbereich unzählige Varianten zur Regelung entwickelt.

Zurzeit werden zur Steuerung von Lüftungsanlagen meist Schwellwertschaltungen (einfache Mehrpunktregler) eingesetzt. Mehrpunktregler führen jedoch zwangsläufig zu Schwankungen der Regelgröße, was im Falle einer Tunnellüftungsanlage immer wieder zu unerwünschten Beeinflussungen der Rauchausbreitung führt.

Mit kontinuierlich arbeitenden PI- oder PID-Regler können solche Effekte deutlich reduziert bzw. in vielen Fällen sogar vermieden werden. Darüber hinaus kann damit das Führungs- und Störverhalten erheblich leichter und besser angepasst werden als dies mit Mehrpunktreglern der Fall ist. PI- bzw. PID-Regler werden derzeit jedoch nur vereinzelt und meist nur bei Anlagen mit drehzahlgeregelten Ventilatoren eingesetzt.

PI- oder PID-Regler müssen jedoch sorgfältig auf die jeweilige Regelstrecke angepasst werden, andernfalls können die deutlichen Vorteile gegenüber anderen Reglern nicht ausgenutzt werden und die erzielten Ergebnisse können schlechter ausfallen als es z.B. bei einem einfachen Mehrpunktregler. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass Regler (speziell im Bereich Tunnellüftungsanlagen) jedoch nach wie vor auf Basis von Erfahrungswerten und nach dem Prinzip ‚trail and error‘ erfolgen, was sehr zeitaufwändig ist und in vielen Fällen zu nicht gut abgestimmten Reglern führt.

Ziel war es daher ein simples, transparentes und vor allem allgemein anwendbares Inbetriebnahme- und Parametrierschema speziell für PI-Regler in Tunnellüftungsanlagen zu finden, dass eine optimal an die Regelstrecke angepasste, zielgerichtete Erstparametrierung und in weiterer Folge Nachoptimierung möglich macht.

Um einen Regler entsprechend an die Strecke anpassen zu können, muss deren Übertragungsverhalten möglichst genau bekannt sein. Das Übertragungsverhalten kann entweder theoretisch aus einem (möglichst exakten) mathematischen Modell abgeleitet werden oder experimentell direkt aus der Sprungantwort des fertiggestellten Lüftungssystems gewonnen werden. In der gegenständlichen Arbeit wurde ausschließlich die experimentelle Streckenidentifikation untersucht. Dazu wurden Sprungantworten aufgezeichnet und analysiert.

Der Sprungantwortverlauf einer Tunnellüftungsanlage ist immer s-förmig, verfügt somit über einen Wendepunkt, strebt für  $t \rightarrow \infty$  auf einen neuen stationären Wert zu und schwingt dabei nicht über, das klassische Verhalten einer proportionalen Regelstrecke mit mehreren Verzögerungselementen.

Zur weiteren Analyse konnte daher das sogenannte Wendetangentenverfahren herangezogen werden. Dieses, rein grafische, Verfahren liefert die wichtigsten Kenngrößen (statische Verstärkung  $K_S$ , Verzugszeit  $T_u$  und Ausgleichszeit  $T_g$ ) zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens und darüber hinaus die Erkenntnis, dass das Übertragungsverhalten einer Tunnellüftungsanlage mit sehr guter Näherung durch ein  $PT_n$ -Glied (Proportionalglied mit  $n$  Verzögerungselementen gleicher Zeitkonstante  $T_S$ ) ersetzt werden kann.

Alternativ (da klar ein  $PT_n$ -Verhalten der Regelstrecke nachgewiesen werden konnte) kann alternativ zum grafischen Wendetangentenverfahren auch die rein rechnerische Zeitprozentkennwertmethode nach SCHWARZE zur Analyse der Sprungantworten herangezogen werden.

In einem weiteren Schritt wurde ein Regler gesucht, der den Anforderungen der Regelstrecke

und der Anlagenverhältnisse entspricht. Gewählt wurde ein PI-Regler in Parallelstruktur mit Anti-Windup, welches den I-Anteil nach Möglichkeit immer an der Sättigungsgrenze hält. Darüber hinaus wurden zusätzliche begleitende steuerungstechnische Maßnahmen entwickelt die eine Umsetzung und Anwendung an nahezu jeder Tunnellüftungsanlage ermöglichen soll und auf die, für den konkreten Anwendungsfall, speziellen Anforderungen Rücksicht nimmt:

- Dynamische Sättigung des Anti-Windup
- Parametrierbare, gleitende Mittelwertbildung am Reglereingang
- Parametrierbares Totband um den eingestellten Sollwert
- Einführung einer parametrierbaren Schalthysterese
- Parametrierbare Zeitverzögerung zur Aktivierung des Reglers (bei Querlüftung)

Diese steuerungstechnischen Maßnahmen sollten in jedem Fall vorab entsprechend umgesetzt und vorgesehen werden. Bei Bedarf kann durch entsprechende Parametrierung die eine oder andere im konkreten Fall nicht benötigte Maßnahme ggf. deaktiviert werden.

Auf Basis der ermittelten Streckenkennwerte ( $K_S$ ,  $T_u$ ,  $T_g$  und Ersatzzeitkonstante  $T_S$ ) kann in weiterer Folge eine gezielte Erstparametrierung gemäß empirischer Einstellregeln (Faustformelverfahren) erfolgen. In der Literatur existieren diesbezüglich zahlreiche verschiedene Verfahren, die zum Teil bereits seit 70 Jahre oder länger existieren und für unterschiedliche Anwendungszwecke und Einstellungsziele entwickelt wurden. Es galt somit in weiterer Folge herauszufinden, welche dieser Verfahren am besten für den konkreten Anwendungsfall einer Tunnellüftung geeignet sind, und den geringsten Nachoptimierungsbedarf mit sich bringen.

Dazu wurden insgesamt 6 der für das festgestellte Übertragungsverhalten ( $PT_n$ -Glieder) gängigen Einstellregeln an einer realen Tunnelanlage getestet:

- Zweite Einstellregeln nach ZIEGLER / NICHOLS
- Die 4 Einstellvarianten nach CHIEN, HRONES und RESWICK
- Die speziell für die Zeitprozentkennwertmethode hergeleiteten Einstellungen n. LATZEL

Die Tests erfolgten unabhängig voneinander sowohl für Führungs- als auch Störverhalten. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich folgender Kriterien (in Anlehnung an die [DIN 19226-1 bis 6, 1994] beurteilt und miteinander verglichen:

- Anregelzeit
- Überschwingweite
- Ausregelzeit
- Schalthäufigkeit der Ventilatoren

Der letzte Punkt ist entscheidend dafür, ob die Reglereinstellungen auch prinzipiell für Anlagen mit netzbetriebenen Strahlventilatoren (ein/aus) geeignet sind. Zu schnelles und häufiges Zu- und Wegschalten kann recht schnell zur Überlastung und in weiterer Folge zum Ausfall eines Strahlventilators führen.

Die zahlreichen durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass, für den gegenständlichen Anwendungsfall einer Tunnellüftungsanlage, die Einstellungen nach CHIEN, HRONES und RESWICK, optimiert für Störverhalten bei begrenzten

Überschwingen (20%) die besten Ergebnisse bzgl. Führungs- und Störverhalten liefern.

Abschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden an zwei sehr unterschiedlichen Tunnelanlagen angewendet und getestet.

Der Tunnel Neumarkt, an dem bereits die Vorversuche zum Vergleich des Führungs- und Störverhaltens verschiedener Einstellunghen durchgeführt wurden, ist ein ca. 2000 m langer Tunnel mit Längslüftung. Er verfügt über insgesamt 7 Strahlventilatoren mit jeweils ca. 880 N Schub, 4 der 7 Strahlventilatoren verfügen über eine Drehzahlregelung, die übrigen 3 können nur ein- oder ausgeschalten werden.

Der Tunnel Götschka ist ca. 4500 m lang und verfügt über eine Ablufthalbquerlüftung. Insgesamt können ca. 250 m<sup>3</sup>/s über die beiden jeweils an den Portalen stationierten Axialventilatoren abgesaugt werden. Die Regelung der Zuströmung zum Absaugort erfolgt über insgesamt 16 Strahlventilatoren die jedoch über keine Drehzahlregelung verfügen.

Mit dem entwickelten Prozedere und den getroffenen steuerungstechnischen Maßnahmen konnten an beiden Testanlagen äußerst zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die Dynamik des Führungsverhaltens führt zu einer schnellen Reaktion des Lüftungssystems die, auch bei ‚ungünstigen‘ Randbedingungen die seitens der österreichischen Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] gestellten, zeitlichen Anforderungen deutlich unterschreitet ohne dabei nennenswert Überschwingen. Es konnte in den zahlreichen Tests prinzipiell keine Neigung zu Schwingungen festgestellt werden. Das Störverhalten (getestet mit Hilfe eines mobilen Tunnelventilators) hat ebenfalls in beiden Fällen überzeugt.

Zusammenfassend hat sich, wie bereits im Rahmen der 8. Internationalen Konferenz ‚Tunnelsicherheit und Tunnelbelüftung‘ in [Schmölzer, Sturm, Zettl, Koppensteiner, & Wierer, 2016] vorgestellt, folgender Ablauf für die Parametrierung und Inbetriebnahme eines PI-Reglers in der Tunnellüftungssteuerung als effektiv und zielführend erwiesen:

**SCHRITT 1:** Aufzeichnung der Sprungantworten (IMMER für beide Strömungsrichtungen)

**SCHRITT 2:** Auswertung der Sprungantworten mit Hilfe des Wendetangenten- oder Zeitprozentkennwertfahrens (Ermittlung von  $K_S$ ,  $T_u$ ,  $T_g$  und  $T_S$ ). Um eine ‚neutrale‘ Reglerauslegung zu erhalten, sollte für alle weiteren Schritte der Mittelwert aller Kenngrößen über beide Strömungsrichtungen herangezogen werden.

**SCHRITT 3:** Erstparametrierung des Reglers auf Basis der Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick (optimiert für Störverhalten und begrenztes Überschwingen)

**SCHRITT 4:** Test des Führungsverhaltens (Sprung auf Sollwert im Brandfall). Dieser Test sollte im ersten Schritt immer (auch bei Anlagen mit Absaugung) für reine Längslüftung erfolgen. Aus den Testergebnissen kann ein eventueller Nachoptimierungsbedarf festgestellt werden.

*Bei Bedarf sind die Parameter entsprechend anzupassen. Sollten Änderungen an den Reglereinstellungen durchgeführt werden, muss SCHRITT 4 anschließend wiederholt werden.*

**SCHRITT 5 (nur bei Systemen mit Absaugung):** Test des Führungsverhaltens bei Querlüftung. Die zahlreichen Tests haben gezeigt, dass die an Hand der Längslüftung bereits optimierten Einstellungen auch bei Querlüftung zu ansprechenden Ergebnissen führen und eine weitere Optimierung in den meisten Fällen nicht mehr erforderlich ist.

*Sollte das Führungsverhalten bei Querlüftung jedoch unzureichend sein, sind ggf. noch Änderungen durchzuführen. In diesem Fall wäre anschließend SCHRITT 5 zu wiederholen.*

**SCHRITT 6:** Test des Störverhaltens durch Aufschalten geeigneter, äußerer Störgrößen (z.B. mobiler Ventilator)

Mit der dargestellten Vorgehensweise und der Umsetzung der entwickelten steuerungstechnischen Maßnahmen ist eine einheitliche, transparente und vollständig nachvollziehbare Inbetriebnahme und Parametrierung gewährleistet und es kann, mit minimalem Aufwand, ein gutes und ansprechendes Regelverhalten (sowohl für Führung als auch Störung) erzielt werden.

## 5 Zusammenfassendes Conclusio und Ausblick

Auf Grund der zusehends strenger werdenden Behördenverfahren bei gleichzeitig zunehmender Komplexität der Systeme ist es notwendig einfache und effektive Verfahren zur Inbetriebnahme und Überprüfung von Tunnellüftungsanlagen bzw. deren Systemkomponenten zu entwickeln um in der dafür vorgesehenen (in der Regel äußerst knapp bemessenen) Zeit deren einwandfreie, fehlerfreie Funktion sicherstellen und die Einhaltung der geforderten technischen Standards bzw. Forderungen seitens der geltenden Richtlinien unter allen Umständen garantieren zu können.

In der gegenständlichen Arbeit wurde daher versucht für die drei funktionell wesentlichen Systemkomponenten einer Tunnellüftungsanlage

- Sensorik zur Messung der Längsgeschwindigkeit im Tunnel („Augen“)
- Mechanische Komponenten zur Schubeinbringung in den Tunnel („Herz“)
- Regler zur Ansteuerung der mechanischen Komponenten in Abhängigkeit der gemessenen Luftgeschwindigkeit („Gehirn“)

einfache, möglichst praxisnahe und standardisierbare Methoden zu finden, die eine saubere und transparente Inbetriebnahme gewährleisten.

### Sensorik zur Messung der Längsgeschwindigkeit

Die Sensoren zur Messung der tatsächlich im Tunnel vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten sind die „Augen“ des Lüftungssystems.

Bei der Überprüfung der Sensorik zur Messung der Luftgeschwindigkeit gilt es gemäß den Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] sicherzustellen, dass die „mittlere“ Geschwindigkeit im Tunnelfahrraum erfasst und abgebildet wird. Da in einem Straßentunnel betriebsbedingt permanente Messsysteme (egal ob Punkt- oder Streckengemittelte Messverfahren) lediglich außerhalb des Lichtraumprofils angebracht werden können, gilt es somit im Rahmen der Inbetriebnahme durch entsprechende Referenzmessungen vorhandene Abweichungen zur „mittleren“ Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt festzustellen und gegebenenfalls durch entsprechende Korrekturen auszugleichen.

Da die existierenden standardisierten und genormten Messverfahren [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] eigentlich für technischen Strömungen in Rohrleitungen entwickelt wurden ist eine Anwendung in Tunnelquerschnitten mit enormen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Ziel war es daher, vergleichenden Messungen zwischen einem solchen Messnetz gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991] und mehreren unterschiedlichen Anordnungen von streckenmittelnden Ultraschallgeschwindigkeitssensoren durchzuführen um herauszufinden welche Konstellation dazu geeignet ist, die tatsächlich „mittlere“ Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt bestmöglich abzubilden und die aufwendige Netzmessung in Zukunft entsprechend ersetzen zu können.

Die Untersuchungen wurden in den zwei, für Straßentunnel, häufigsten Querschnittsformen (Rechteck- bzw. Kastenprofil und Hufeisenprofil) durchgeführt. Insgesamt wurden 3 mögliche Anordnungen der streckenmittelnden Geschwindigkeitsmessgeräte getestet:

- Über dem Lichtraumprofil (auf Höhe der später unter Betrieb laufenden Messung)
- Einfach-diagonal auf Höhe des Schwerpunkts / der Mittelachse des Querschnitts
- gekreuzt und doppelt-diagonal zwischen Fahrbahnoberkante (FOK) und knapp unter dem Lichtraumprofil

Sowohl im Rechteck- als auch im Hufeisenprofil lagen die Abweichungen zur Referenz (Netzmessungen gemäß [VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991]) für alle getesteten

Aufbauvarianten durchwegs, mit wenigen Ausnahmen, im Bereich der Größenordnung der zulässigen Abweichungen der verwendeten Messgeräte.

Dies zeigt klar, dass streckenmittelnde Geschwindigkeitssensoren prinzipiell (bei sorgfältiger Wahl der Wahl des Messpfades) dazu geeignet sind, die mittlere Geschwindigkeit in einem Querschnitt abzubilden.

Im Rechteckquerschnitt haben die beiden gekreuzt und doppelt-diagonal angeordneten Messgeräte die mit Abstand geringsten Abweichungen aufgewiesen. Es hat sich zudem gezeigt dass eine Mittelwertbildung der beiden gegengleich gekreuzten Messungen Abweichungen durch vorhandene Asymmetrien im Strömungsprofil (z.B. durch eine Kurve o.ä.) gut auszugleichen vermag.

Im Hufeisenquerschnitt lieferte die einfach-diagonale Messung auf Höhe des Flächenschwerpunkts die besten Ergebnisse. Die gekreuzte, doppelt-diagonale Messanordnung, welche im Rechteckquerschnitt die geringsten Abweichungen aufzuweisen hatte, lieferte hier jedoch die schlechtesten Resultate. Grund hierfür ist, dass der Kern des Geschwindigkeitsprofils (mit den höchsten lokalen Geschwindigkeiten) bei der gewählten Aufbauhöhe der beiden oberen Sensorköpfe nicht ausreichend von den Messpfaden erfasst wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch im Hufeisenprofil mit dieser Anordnung ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden können wie beim Rechteckquerschnitt, wenn die Höhe der beiden oberen Messköpfe so gewählt wird, dass sich die beiden Messpfade im Bereich des Profilkerns (entspricht in etwa der Höhe des Flächenschwerpunkts des Querschnitts) kreuzen.

Insgesamt konnte somit gezeigt werden, dass die aufwändige Netzmessung durchaus adäquat durch streckenmittelnde Ultraschallsensoren ersetzt werden kann und dabei eine für die Inbetriebnahme und Referenzierung von Geschwindigkeitsmessstellen in Tunnelanlagen absolut ausreichende Genauigkeiten erzielt werden können. Die Messung sollte dabei jedoch entweder parallel zur Fahrbahn oder doppelt-diagonal aufgebaut werden, wobei die Höhe über Fahrbahn (für beide bzw. den oberen Messkopf) so gewählt werden soll dass der Messpfad den Flächenschwerpunkt schneidet. Um Einflüsse von Asymmetrien im Strömungsprofil besser ausgleichen zu können, sollten bei der doppelt-diagonalen Messanordnung jedoch immer zwei gegengleich gekreuzte Sensorpaare zum Einsatz kommen.

### **Messung des effektiv eingebrachten Schubs im Tunnel**

Die Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] sehen vor, dass die Längsgeschwindigkeit in einem Tunnel im Brandfall gezielt beeinflusst werden können muss. Dazu muss eine Kraft auf die Luftsäule ausgeübt werden, welche diese entweder beschleunigt oder bremst. Dafür werden mechanische Komponenten im Tunnel installiert, mit deren Hilfe ein entsprechender Schub in den Tunnel eingebracht werden kann. Diese stellen in gewisser Weise somit das ‚Herz‘ der Lüftungsanlage dar.

Die unvermeidbaren Verluste bei der Umsetzung dieses Impulses / Schubs im Tunnel werden durch einen sogenannten Impulsumsetzungskoeffizienten, eine Art Wirkungsgrad, ausgedrückt. Da dieser jedoch von mehreren Einflussfaktoren abhängt von denen zum Zeitpunkt der Planung nicht alle bekannt sind, müssen vorab entsprechende Annahmen (basierend auf Erfahrungswerten oder in komplexeren Fällen auf Simulationen) getroffen werden.

Die Messung des effektiv in einen Tunnel einbringbaren Schubs im Rahmen der Inbetriebnahme dient somit dazu, zu überprüfen ob der in der Planungsphase angenommene Schub auch tatsächlich an der fertigen Anlage verfügbar ist. Ist dies nicht der Fall, kann es sein dass die seitens der Richtlinien [RVS 09.02.31, 2014] geforderten Lüftungsziele (Sollgeschwindigkeiten und Zeitspannen, innerhalb derer diese erreicht werden müssen) nicht oder nur teilweise eingehalten werden können.

Ziel war es daher für die beiden am häufigsten im Straßentunnelbereich eingesetzten Systeme (Strahlventilatoren und Impulssysteme welche nach dem Saccardo-Prinzip arbeiten) einfache Messanordnungen zur Ermittlung des effektiv einbringbaren Schubs aufzuzeigen welche mit geringfügigen Anpassungen auf nahezu jeden Tunnel übertragbar sind.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit den verwendeten Messkonzepten mit relativ geringem Aufwand direkt vor Ort an der fertigen Anlage sehr gute Ergebnisse mit geringen Messunsicherheiten erzielt werden können.

Für die gegenständliche Arbeit wurden die beiden Messkonzepte darüber hinaus jedoch deutlich erweitert:

An den untersuchten Strahlventilatoren wurde die Ausblasgeschwindigkeit mit Hilfe von eigens dafür konstruierten Sonden, welche auf dem Staudruckprinzip basieren, gemessen um einerseits aus den ermittelten Impulsumsetzungskoeffizienten den sogenannten ‚Installations- oder Einbaufaktor‘ abspalten und andererseits den Standschub im eingebauten Zustand überprüfen zu können.

An den beiden untersuchten Impulssystemen wurden zusätzlich alle Parameter messtechnisch erfasst, welche dazu benötigt werden um den theoretisch maximal einbringbaren Schub für die jeweilige Klappenstellung errechnen zu können. Dadurch konnte, analog zum Standschub bei Strahlventilatoren, eine Bezugsgröße geschaffen werden, um in weiterer Folge auch für ein Impulssystem den entsprechenden Umsetzungskoeffizienten ermitteln zu können.

Beide Messkonzepterweiterungen sind jedoch mit einem zum Teil erheblichen zusätzlichen messtechnischen Aufwand verbunden und für eine reine Bestimmung des effektiv einbringbaren Schubs im Rahmen einer Inbetriebnahme nicht zwingend erforderlich.

Die dadurch ermöglichte Bestimmung der Impulsumsetzungskoeffizienten lässt jedoch Vergleiche mit anderen, vorangegangenen (meist theoretischen) Studien diesbezüglich zu. Die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit gewonnen Messergebnisse zeigen durchwegs gute Übereinstimmungen zu den bislang in der Literatur existierenden (in der Regel auf durchgeführte Simulationen und Berechnungen basierenden) Werten.

Insbesondere bei Strahlventilatoren entsteht dadurch zudem die Möglichkeit, die bislang in der Planung verwendeten Erfahrungs- oder Literaturwerte bzgl. des Installations- oder Einbaufaktors sukzessive durch deutlich belastbarere gemessene Werte ersetzen zu können. Eine wachsende ‚Datenbank‘ mit im Rahmen von Inbetriebnahmen ermittelten Installations-/Einbaufaktoren kann die bisher damit verbundene Planungsunsicherheit und in weiterer Folge die dafür berücksichtigten Reserven dadurch zusehends reduzieren, was zu einer deutlich geringeren Überdimensionierung und somit effektiveren Anlagen führen kann.

Unabhängig davon sollte zukünftig die Messung des effektiv eingebrachten Schubs in Tunnelanlagen fixer Bestandteil der Inbetriebnahme der Tunnellüftung werden, um gewährleisten zu können dass die Planung richtlinienkonform ausgeführt und umgesetzt wurde.

### **PI-Regler in der Lüftungssteuerung**

Herzstück und gewissermaßen das ‚Gehirn‘ der Lüftungssteuerung ist der Regler. Er verarbeitet die einlangenden Messwerte der Geschwindigkeitssensorik (‚Augen‘) und ermittelt daraus, wieviel Schub nötig ist, um den gewünschten Sollwert erreichen zu können. Aus seinem Ausgangssignal bekommt die Steuerung die Information die sie benötigt um zu wissen wie die zur Schubeinbringung installierten mechanischen Komponenten (das ‚Herz‘ der Anlage) angesteuert werden müssen.

Der Regler bestimmt wie schnell und dauerhaft die vorgegebenen Lüftungsziele (Zielgeschwindigkeiten) erreicht werden können und hat damit maßgeblichen Einfluss auf die

Rauchausbreitung (und in weiterer Folge somit auch auf die Sicht- und Fluchtbedingungen) bei einem Brand im Tunnel.

Bislang wurden auf dem Gebiet der Tunnellüftungsanlagen diesbezüglich meist sogenannten ‚Schwellwertschaltungen‘ (eine einfache Form des Mehrpunktreglers) eingesetzt. Diese führen jedoch prinzipbedingt und zwangsläufig zu Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel was immer wieder zu unerwünschten Auswirkungen auf Rauchschichtung und –ausbreitung führt.

Kontinuierlich arbeitende PI-Regler hingegen können den vorgegebenen Sollwert dauerhaft und stabil halten, eventuell vorhandene Schwankungen sind im direkten Vergleich meist minimal. Außerdem ist das Führungs- und Störverhalten deutlich weniger von den äußeren Bedingungen abhängig und kann wesentlich besser eingestellt werden.

Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Einstellungen des PI-Reglers sorgfältig auf die jeweilige Regelstrecke abgestimmt sind. Sofern PI-Regler derzeit überhaupt zum Einsatz kommen, so werden diese in den meisten Fällen jedoch auf Basis von Erfahrungswerten bzw. nach dem Prinzip ‚trial and error‘ parametrieren. Dies ist zeitaufwendig und führt in vielen Fällen zu ungünstig eingestellten Reglern mit entsprechend suboptimalem Verhalten.

Die beste Sensorik und die ausgetüfteltste Lüftungstechnik bringt nichts, wenn der Regler falsch parametrieren ist – das Lüftungssystem kann nur so gut sein wie der Regler es zulässt.

Das Ziel war es daher, ein einfaches und praxisnahes Parametrier- und Inbetriebnahmeschema zu finden, welches eine zielgerichtete Erstparametrierung und ggf. Nachoptimierung ermöglicht und zu einem ansprechenden Führungs- und Störverhalten führt.

Dazu wurden bekannte Verfahren aus der Regelungstechnik zur experimentellen Streckenidentifikation (Wendetangentenverfahren und Zeitprozentkennwertmethode) an realen Tunnellüftungsanlagen angewendet um deren Übertragungsverhalten herausfinden zu können. Es hat sich gezeigt dass es sich dabei um das Übertragungsverhalten eines PTn-Elements (Verzögerungsglied höherer Ordnung mit n gleichen Zeitkonstanten) handelt, wobei die Ordnung n in den untersuchten Fällen bei 3 bzw. 4 lag.

In weiterer Folge wurden zusätzlich zum verwendeten klassischen PI-Regler mit Anti-Windup mehrere steuerungstechnische Maßnahmen erarbeitet, welche es ermöglichen sollen diese Art der Regelung an nahezu jedem Typ von Lüftungsanlage (mit oder ohne Absaugung, mit oder ohne Möglichkeit der Drehzahlregelung) umzusetzen.

Um herauszufinden, welche der unzähligen in der Literatur existierenden empirischen Einstellregeln (sog. ‚Faustformelverfahren‘) für eine Erstparametrierung einer Tunnellüftungsanlage am besten geeignet sind, wurden insgesamt 6 der bekanntesten Regeln an einer realen Anlage unabhängig und getrennt voneinander bzgl. Führungs- und Störverhalten getestet, bewertet und miteinander verglichen. Die Einstellungen nach CHIEN, HRONES und RESWICK lieferten hier die insgesamt (über Führungs- und Störverhalten betrachtet) ansprechendsten Ergebnisse.

Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen in Verbindung mit den entwickelten steuerungstechnischen Maßnahmen wurden dann an zwei äußerst unterschiedlichen Tunnelanlagen (einem ca. 2 km langen, längsgelüfteten Tunnel mit Standardquerschnitt und teilweise drehzahlgeregelten Strahlventilatoren und einem ca. 4,5 km langen, abluflhalbquergelüfteten Tunnel mit durchgängig dreispurigem Querschnitt und ausschließlich netzgesteuerten Ventilatoren) umgesetzt.

Das resultierende Verhalten der Regelgröße konnte in beiden Fällen überzeugen, es konnte sowohl ein durchaus ansprechendes Führungs- als auch Störverhalten erreicht werden. Die getroffenen steuerungstechnischen Maßnahmen haben sich ebenfalls an beiden untersuchten

Anlagen bewährt und ermöglichten eine reibungslose Umsetzung des Reglers.

Abschließend wurde aus den gewonnenen Erkenntnissen ein mögliches Parametrier- und Inbetriebnahmeschema abgeleitet, welches zukünftig eine zielgerichtete, standardisierte und durchgehend transparente Inbetriebnahme und Parametrierung von PI-Reglern in der Lüftungssteuerung ermöglichen soll.

Insgesamt konnten für jeden der drei untersuchten Bereiche einer Tunnellüftungsanlage somit durchwegs einfache, praxisnahe und vor allem allgemein anwendbare Prozedere skizziert und beispielhaft dargestellt werden, welche einen gleichbleibenden Standard bei der Inbetriebnahme dieser für die einwandfreie, richtlinienkonforme Funktion des Gesamtsystems gewährleisten und gleichzeitig die Grundlage für eine lückenlose Überprüfung und Dokumentation gemäß den Vorgaben aus §8 des Straßentunnelsicherheitsgesetzes bilden.

## 6 Literaturverzeichnis

- Altenburger, P., Riess, I., & Brandt, R. (2013). *Control of longitudinal airflow in road tunnels in case of fire*. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- ASTRA 13 001. (2008). *Richtlinie: Lüftung der Strassentunnel - Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung*. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- Beyer, M., Sturm, P. J., Saurwein, M., & Bacher, M. (2016). *Evaluation of Jet Fan Performance*. Graz: 8th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'.
- Christen, D. S. (2010). *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik* (bearbeitete und ergänzte Auflage, 2. Ausg.). Berlin, Deutschland: Springer Verlag.
- DIN 19226-1 bis 6. (1994). *Regelungstechnik und Steuerungstechnik*. 10772 Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH.
- ELIN GmbH. & CO.KG. (04. 06 2014). A11 Karawankenautobahn, Karawankentunnel - Freigabepanung. *Plannr.: A11-000-11-712-0; 'Regelquerschnitt SV Bauphasen'*.
- Galehr, J. (2012). *Effektivität der Schubeinbringung durch Strahlventilatoren in Tunneln*. *Diplomarbeit*. Technische Universität Graz.
- Grässlin, U., Nodirolo, G., & Drost, U. (2013). *Luftströmungsmessung in Strassentunneln*. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- Hering, E., Bressler, K., & Gutekunst, J. (2014). *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler* (6. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Honeywell International Inc. (2007). *Grundlagen der Reglerparametrierung*. Abgerufen am 14. 11 2016 von <http://www.honeywell.de/FP/PI/regler/Reglerparametrierung.pdf>
- ISO/DIS 3966. (2008). *Durchflussmessungen von Fluiden in geschlossenen Leitungen - Netzmessung mittels Staudrucksonden*.
- Kempf, J. (1965). *Einfluss der Wandeffekte auf die Treibstrahlwirkung eines Strahlgebläses*. Zürich: 'Aerodynamik der Tunnellüftung' in Schweizer Bauzeitung, Vol. 4, pp 47-52.
- Lutz, H., & Wendt, W. (2014). *Taschenbuch der Regelungstechnik* (ergänzte Auflage, 10. Ausg.). Haan-Gruiten, Deutschland: Verlag Europa-Lehrmittel.
- Meidinger, U. (1964). *Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläse*. Zürich: Schweizerische Bauzeitung, Vol. 28, pp 498-501.
- Pospasil, P., Ilg, L., Di Miele, A., Krasnobajew, N., Jordan, A., Frey, S., et al. (2010). *Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall*. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- RABT. (2006). *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

- Richtlinie 2004/54/EG*. (2004). des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz.
- RN-Wissen*. (13. September 2014). Abgerufen am 10. November 2016 von RN-Wissen: [http://rn-wissen.de/wiki/index.php?title=Regelungstechnik#Vergleich\\_der\\_Reglertypen](http://rn-wissen.de/wiki/index.php?title=Regelungstechnik#Vergleich_der_Reglertypen)
- Rohne, E. (1964). *Über die Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläse*. Zürich: Schweizerische Bauzeitung, Vol. 48, pp 840-844.
- Rohne, E. (1979). *The Friction Losses on Walls Caused by the Jet Flows of Booster Fans*. Sheffield: International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, pp 57-70.
- Rohne, E. (1988). *The Friction Losses on Walls Caused by a Row of Four Parallel Jet Flows*. Durham: 6th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, pp 151-164.
- Rohne, E. (1991). *Friction Losses of a Single jet due to its Contact with Vaulted Ceiling*. Brighton: 3th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, pp 679-687.
- RVS 09.02.22. (2014). *Tunnel / Tunnelausrüstung / Betrieb und Sicherheit - Tunnelausrüstung*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.02.31. (2014). *Tunnel / Tunnelausrüstung / Belüftung - Grundlagen*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- SAMSON AG - Mess- und Regeltechnik. (Jänner 2012). *Technische Informationen, Regler und Regelstrecken*. Abgerufen am 10. November 2016 von [www.samson.de](http://www.samson.de): [https://www.samson.de/pdf\\_de/1102de.pdf](https://www.samson.de/pdf_de/1102de.pdf)
- Saurwein, M. (2014). *Beurteilung der Effektivität der Schubeinbringung durch Strahlgebläse in Tunneln mit Hilfe numerischer Modelle und Messungen*. Diplomarbeit. Technische Universität Graz.
- Schmölzer, G., Sturm, P., Zettl, D., Koppensteiner, W., & Wierer, A. (2016). *Ventilation Control in the Case of Fire: A Practical Approach to the Implementation of PI Controllers*. Graz: 8th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'.
- Schneider, W. (2008). *Praktische Regelungstechnik* (vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 3. Ausg.). Wiesbaden, Deutschland: Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH.
- STSG. (2013). *Straßentunnel-Sicherheitsgesetz*. Bundesgesetz über die Sicherheit von Straßentunneln, BGBl.I Nr. 54/2006, Änderungen: 1. Novelle BGBl.I Nr. 111/2010; 2. Novelle BGBl.I Nr. 96/2013.
- Sturm, P. J., Beyer, M., & Bacher, M. (2013). *Consideration of a Saccardo nozzle system for tunnel ventilation applications: A simple calculation method for a one dimensional approach*. Barcelona: International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, pp 105-119.

Sturm, P., Beyer, M., & Rafiei, M. (2015). *On the problem of ventilation control in case of a tunnel fire event*. Elsevier publishing, doi: 10.1016/j.csfs.2015.11.001.

Sutterlüty, M. (2012). *Vergleich unterschiedlicher methodischer Ansätze zur Dimensionierung von Tunnelbelüftungsanlagen*. Diplomarbeit. Technische Universität Graz.

TLT Turbo Lufttechnik GmbH. (1990). Bestandsunterlagen A11 Karawankentunnel. *Plannr.: 36W 1657a; 'Einbau-Position Strahllüfter*.

Truckenbrodt, E. (2008). *Fluidmechanik, Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide* (4. Ausg.). Leipzig: Springer Verlag.

VDI/VDE Richtlinie 2640 - Blatt 3. (1983). *Netzmessung in Strömungsquerschnitten - Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitten*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1. (1991). *Netzmessungen in Strömungsquerschnitten - Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.

Walter, H. (2009). *Grundkurs Regelungstechnik* (2. Ausg.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner / GWV Fachverlage GmbH.