



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall

**Régulation de la vitesse d'air dans les tunnels routiers en  
cas d'incendie**

**Control of longitudinal airflow in road tunnels in case of  
fire**

**HBI Haerter AG**  
**Dipl. Ing. Patrick Altenburger**  
**Dr. Ingo Riess**  
**Dr. Rune Brandt**

**Forschungsauftrag ASTRA 2010/017\_OBF auf Antrag des  
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

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

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall

**Régulation de la vitesse d'air dans les tunnels routiers en  
cas d'incendie**

**Control of longitudinal airflow in road tunnels in case of  
fire**

**HBI Haerter AG**  
**Dipl. Ing. Patrick Altenburger**  
**Dr. Ingo Riess**  
**Dr. Rune Brandt**

**Forschungsauftrag ASTRA 2010/017\_OBF auf Antrag des  
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

## Impressum

### Forschungsstelle und Projektteam

**Projektleitung**

Dr. Ingo Riess

**Mitglieder**

Dipl. Ing. Patrick Altenburger

Dr. Rune Brandt

### Begleitkommission

**Präsident**

Marcel Berner

**Mitglieder**

Christian Gammeter

Florian Albertin

Dr. Franz Zumsteg

Christian Feltscher

Prof. Dr. Lino Guzzella

### Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

### Bezugsquelle

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

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>10</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>29</b>
1.1	Ziele des Forschungsprojekts .....	29
1.2	Vorgabe der Schweizer Richtlinie [1] an die Ereignislüftung .....	30
1.3	Stand der Technik – Regelung der Strömungsgeschwindigkeit in Tunneln .....	32
<b>2</b>	<b>Modellierung des Systems Tunnel mit Lüftungsanlage</b> .....	<b>35</b>
2.1	Beschreibung der untersuchten Systeme .....	37
2.1.1	Beschreibung des Systems Längslüftung .....	37
2.1.2	Beschreibung des Systems Absaugung .....	37
2.2	Modellierung der Strahlventilatoren .....	38
2.2.1	Dynamik der Strahlventilatoren .....	38
2.2.2	Modellierung der zeitlichen Verzögerung beim Einschalten mehrerer Strahlventilatoren .....	42
2.2.3	Druckwirkung der Strahlventilatoren im Tunnel .....	43
2.3	Modellierung des Abluftsystems .....	45
2.4	Modellierung der Strömungsmessung .....	47
2.5	Modellierung eines Tunnels ohne Absaugung .....	49
2.5.1	Herleitung der Differentialgleichung eines Tunnels ohne Absaugung .....	49
2.5.2	Modell Tunnel bei Stau und ohne äussere Stördrücke (Tunnel LL) .....	55
2.5.3	Vereinfachte Differentialgleichung für das Modell Tunnel LL .....	55
2.5.4	Herleitung der Sprungantwort des nichtlinearen Modells Tunnel LL .....	56
2.5.5	Stationärer Zustand des Modells Tunnel LL .....	58
2.5.6	Herleitung der Sprungantwort Modells Tunnel LL unter Berücksichtigung der limitierten SV-Einschaltrate .....	60
2.6	Modellierung eines Tunnels mit Absaugung (System ABS) .....	67
2.6.1	Herleitung der Differentialgleichung für das System ABS .....	67
2.6.2	Vereinfachte Differentialgleichung für das System ABS .....	71
2.6.3	Differentialgleichung des Systems ABS bei stationärer Absaugung .....	72
2.6.4	Stationärer Zustand des Systems ABS .....	72
2.6.5	Anzahl Strahlventilatoren für Symmetrische Strömung .....	79
<b>3</b>	<b>Näherungsmodelle des Tunnels mit Längslüftung</b> .....	<b>80</b>
3.1	Linearisiertes Modell des Tunnels mit Längslüftung .....	80
3.1.1	Differentialgleichung Linearisiertes Modell des Tunnels LL .....	81
3.1.2	Übertragungsfunktion Linearisiertes Modell des Tunnels LL .....	81
3.1.3	Sprungantwort linearisiertes Modell des Tunnels LL .....	82
3.2	Tunnel LL als Tiefpass 1. Ordnung .....	83
3.2.1	Sprungantwort des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) .....	83
3.2.2	Differentialgleichung des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) .....	84
3.2.3	Übertragungsfunktion des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) .....	85
<b>4</b>	<b>Modelle des Systems LL</b> .....	<b>86</b>
4.1	Nicht-lineare Modelle des Systems LL ohne Messung (Tunnel und SV) .....	87
4.1.1	Nicht-lineares System LL ohne Messung (Tunnel nicht-linear, SV als PT1) .....	87
4.1.2	Nicht-lineares System LL mit Totzeit ohne Messung (Nicht-lineares Modell des Tunnels, SV als Totzeit) .....	88
4.2	Lineare Modelle des Systems LL ohne Messung (Tunnel und SV) .....	91
4.2.1	Linearisiertes System LL ohne Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1) .....	91
4.2.2	System LL als Tiefpass 2. Ordnung ohne Messung (Tunnel als PT1, SV als PT1) .....	94
4.2.3	System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit ohne Messung (Tunnel als PT1, SV als Totzeit) .....	97
4.3	Lineare Modelle des Systems LL mit Messung (Tunnel, SV und Messung) .....	99
4.3.1	Linearisiertes System LL mit Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV und Messung gemeinsam als PT1) .....	99
4.3.2	System LL mit Messung als Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV und	

	Messung gemeinsam als PT1) .....	100
4.3.3	System LL mit Messung als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV und Messung als Totzeit) .....	101
4.3.4	Linearisiertes System LL mit Messung als Tiefpass 3. Ordnung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1, Messung als PT1) .....	102
4.3.5	System LL mit Messung als Tiefpass 3. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1, Messung als PT1) .....	104
4.4	Zusammenfassung der Modelle des Systems LL .....	106
<b>5</b>	<b>Analyse des Systems</b> .....	<b>108</b>
5.1	Pole des Systems LL .....	108
5.1.1	Pole linearisiertes System LL .....	108
5.1.2	Pole System LL PT2 .....	108
5.1.3	Pole System LL PT1TZ .....	109
5.1.4	Zusammenfassung Pole System LL .....	110
5.2	LTI-System LL im Zustandsraummodell .....	110
5.2.1	Zustandsraummodell des Linearisierten Systems LL ohne Messung .....	111
5.2.2	Zustandsraummodell des Systems LL als PT2 .....	113
5.2.3	Zustandsraummodell des Systems LL mit Messung als PT3 .....	114
5.2.4	Zustandsraummodell des Systems LL mit Messung als PT1TZ .....	116
5.3	Stabilität des Systems LL .....	117
5.3.1	Stabilität des Linearisierten Systems und des Systems PT2 ohne Messung .....	117
5.3.2	Stabilität des Systems LL mit Messung als PT3 .....	118
5.4	Beobachtbarkeit des Systems LL .....	119
5.5	Steuerbarkeit des Systems LL .....	121
5.6	Frequenzgang des Linearen Systems LL .....	123
5.6.1	Bode-Diagramm System LL .....	123
5.6.2	Ortskurve System LL .....	124
<b>6</b>	<b>Grundauslegung einer Regelung</b> .....	<b>125</b>
6.1	Vorgabe an Absaugung und Längsströmungskontrolle .....	125
6.2	Anforderung und Umsetzung .....	126
6.3	Auswahl eines Reglers .....	127
6.4	Regelungsziele im Brandfall .....	127
6.4.1	Regelungsziel beim System Längslüftung .....	127
6.4.2	Regelungsziel beim System mit Absaugung und Symmetrischer Regelung .....	128
6.4.3	Regelungsziel beim System mit Absaugung und Regelung von $v_L$ .....	129
6.5	Regelungskreise der Systeme Längslüftung und Absaugung .....	130
6.5.1	Regelungskreis des Systems Längslüftung .....	130
6.5.2	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung .....	131
6.5.3	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$ .....	132
<b>7</b>	<b>PID-Regler</b> .....	<b>133</b>
7.1	Formen von PID-Reglern .....	133
7.1.1	Idealer PID-Regler (mit idealem D-Glied) .....	133
7.1.2	PI-Regler .....	134
7.1.3	Realer PID-Regler (PIDF-Regler mit realem D-Glied) .....	135
7.1.4	PI-/PID-Regler mit Anti-Windup .....	136
7.2	Auswahl der Parameter und Tuning .....	138
7.3	Klassische Folgeregelung .....	139
7.3.1	Übertragungsfunktion des Reglers .....	139
7.3.2	Übertragungsfunktion des Systems .....	140
7.4	Einstellwerte nach Ziegler/Nichols .....	141
7.4.1	Ziegler/Nichols Frequency Response Method .....	141
7.4.2	Ziegler/Nichols Step Response Method .....	143
7.5	Regelung des Systems Längslüftung mit Einstellungen nach Ziegler/Nichols .....	145
7.5.1	Regelungsziel beim System Längslüftung .....	145
7.5.2	Regelungskreis des Systems Längslüftung .....	145
7.5.3	Herleitung der Regelparameter für die PI- und PID-Regelung .....	146
7.5.4	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI- und PID-Regler .....	148
7.5.5	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI- und PID-Regler .....	150
7.5.6	Schlussfolgerungen Regelung des Systems LL mit PI-/PID-Regelung .....	151
7.6	Regelung des Systems mit Absaugung mit Einstellungen nach Ziegler/Nichols .....	152
7.6.1	Regelungsziel bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS .....	152

7.6.2	Regelungsziel bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit des Systems ABS .....	152
7.6.3	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung .....	153
7.6.4	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$ .....	153
7.6.5	Herleitung der Regelparameter für die PI- und PID-Regelung .....	153
7.6.6	Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	155
7.6.7	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal .....	157
7.6.8	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	159
7.6.9	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	161
7.6.10	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal .....	163
7.6.11	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	165
7.6.12	Schlussfolgerungen Regelung des Systems mit Absaugung mit PI-/PID-Regelung .....	166
<b>8</b>	<b>Schrittweise Berechnung der Anzahl SV (Modellbasierte Regelung) .....</b>	<b>167</b>
8.1	Regelung des Systems Längslüftung mit „schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ ..	167
8.1.1	Herleitung der Anzahl zu schaltenden SV beim System LL .....	167
8.1.2	Regelungsziel beim System Längslüftung .....	169
8.1.3	Regelungskreis des Systems Längslüftung .....	170
8.1.4	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit schrittweiser Berechnung der Anzahl SV .....	171
8.1.5	Schlussfolgerungen Regelung des Systems Längslüftung mit Schrittweiser Berechnung der SV .....	172
8.2	Regelung des Systems mit Absaugung mit „schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ .....	173
8.2.1	Herleitung der Anzahl zu schaltenden SV beim System ABS .....	173
8.2.2	Regelungsziel bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS .....	175
8.2.3	Regelungsziel bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit des Systems ABS .....	176
8.2.4	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung .....	177
8.2.5	Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$ .....	177
8.2.6	Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	178
8.2.7	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal .....	180
8.2.8	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	182
8.2.9	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	184
8.2.10	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal .....	186
8.2.11	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	188
8.2.12	Schlussfolgerungen Regelung des Systems mit Absaugung mit Schrittweiser Berechnung der SV .....	189
<b>9</b>	<b>Model Predictive Control (MPC-Regelung).....</b>	<b>190</b>
9.1	Funktionsprinzip [21] .....	190
9.1.1	Prädiktion .....	191
9.1.2	Dynamische Optimierung .....	192
9.1.3	Prinzip des gleitenden Horizonts.....	193
9.1.4	Vorhersagekorrektur .....	193
9.2	Einstellparameter von MPC-Reglern .....	194
9.2.1	Abtastzeit $t_s$ .....	194
9.2.2	Modellhorizont $n_M$ .....	195
9.2.3	Steuerhorizont $n_C$ .....	195
9.2.4	Prädiktionshorizont $n_P$ .....	195
9.2.5	Gewichtungsmatrizen Q und R .....	196
9.2.6	Zusammenfassung Einstellparameter für MPC-Regelung .....	196
9.3	Interne lineare Systemmodelle für den MPC-Regler .....	196
9.4	Regelung des Systems Längslüftung mit MPC-Regler .....	197
9.4.1	Regelungsziel beim System Längslüftung .....	197
9.4.2	Regelungskreis des Systems Längslüftung .....	197
9.4.3	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit MPC-Regelung.....	198
9.4.4	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit MPC-Regelung.....	200
9.4.5	Schlussfolgerungen MPC-Regelung des Systems Längslüftung .....	201
9.5	Regelung des Systems mit Absaugung mit MPC-Regler .....	201
<b>10</b>	<b>Vergleich verschiedener Regelungen.....</b>	<b>202</b>
10.1	Regelung des Systems Längslüftung auf Sollwert.....	202
10.1.1	Regelung des Systems Längslüftung auf 1 m/s.....	202
10.1.2	Regelung des Systems Längslüftung auf 3 m/s.....	204

10.1.3	Schlussfolgerung Vergleich Regelungen des Systems Längslüftung .....	205
10.2	Regelung des Systems mit Absaugung .....	206
10.2.1	Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	206
10.2.2	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal.....	208
10.2.3	Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	210
10.2.4	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels .....	212
10.2.5	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal.....	214
10.2.6	Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal .....	216
10.2.7	Schlussfolgerung Vergleich Regelungen des Systems ABS .....	217
<b>11</b>	<b>Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick .....</b>	<b>218</b>
11.1	Schlussfolgerungen .....	218
11.2	Empfehlungen .....	219
11.3	Mögliche Weiterführung des Forschungsprojekts .....	220
<b>12</b>	<b>Rezept für eine robuste (PI-) Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung .....</b>	<b>221</b>
12.1	Systemparameter.....	221
12.1.1	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel.....	221
12.1.2	Totzeit der Regelstrecke durch Sprungantwortversuch.....	223
12.1.3	Totzeit der Regelstrecke durch Abschätzung.....	224
12.2	Einstellparameter nach Ziegler/Nichols .....	226
12.3	Wahl des Reglers.....	226
12.4	Regelungskreis für das System Längslüftung .....	227
12.5	Regelungskreis für das System Absaugung mit Symmetrischer Regelung .....	228
12.6	Regelungskreis für das System Absaugung mit Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit .....	228
<b>13</b>	<b>Sensibilitätsanalyse.....</b>	<b>229</b>
13.1	Variation der Totzeiten für die Herleitung der Parameter .....	229
13.1.1	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit verschiedenen Totzeiten.....	230
13.1.2	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit verschiedenen Totzeiten.....	232
13.1.3	Zusammenfassung für die Verwendung verschiedenen Totzeiten .....	233
13.2	Variation der Schaltzeiten der Strahlventilatoren für die Herleitung der Parameter.....	234
13.2.1	Regelung des Systems LL auf 1 m/s bei verschiedenen Schaltzeiten .....	235
13.2.2	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit verschiedenen Schaltzeiten .....	237
13.2.3	Zusammenfassung verschiedene Schaltzeiten der Strahlventilatoren.....	238
13.3	Andere Geometrie, andere Strahlventilatoren .....	239
13.3.1	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler .....	240
13.3.2	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler .....	242
13.3.3	Zusammenfassung andere Geometrie, andere Strahlventilatoren.....	243
13.4	Stördrücke.....	243
13.4.1	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).....	244
13.4.2	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).....	245
13.4.3	Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).....	246
13.4.4	Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).....	247
13.4.5	Vergleich zwischen PI-, PID-Regler und Schrittwaiser Berechnung bei Stördrücken....	248
13.4.6	Zusammenfassung schwingende Stördrücke.....	250
	<b>Anhänge.....</b>	<b>252</b>
	<b>Abkürzungen, Variablen, Indizes .....</b>	<b>273</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>277</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>279</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>282</b>

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden die folgenden Regelungen für die Kontrolle der Längsströmung im Brandfall untersucht und verglichen:

- PI- und PID-Regelung
- Model Predictive Control (MPC-Regelung)
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung zu schaltender Strahlventilatoren“)

Die MPC-Regelung ist schneller als alle anderen untersuchten Regelungen. Aber sie ist aufwändig, mit einer grossen Zahl einzustellender Parameter. Die Verfügbarkeit von Simulationssoftware mit MPC ist stark eingeschränkt. Bei Systemen mit Rauchabsaugung muss der Brandort in das interne Modell einfließen, was die Komplexität des Reglers zusätzlich erhöht.

PI- und PID-Regelung ist nicht ganz so schnell wie die MPC-Regelung. Anstiegszeit und Überschwingung sind ähnlich wie bei MPC, die Einschwingzeit ist jedoch länger. PI- und PID-Regelung sind deutlich schneller als die „Schrittweise Berechnung“, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung. PI- und PID-Regler sind unabhängig vom Brandort. Die Regler sind praktisch in jeder Simulationssoftware vorhanden. Andernfalls können sie einfach aus mathematischen Bausteinen erstellt werden. Der Einbezug des D-Anteils beim PID-Regler kann bei realen Eingangssignalen zu Problemen führen. Somit hat der PI-Regler gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile (kleinere Überschwingung, nur 2 Parameter).

„Schrittweise Berechnung der zu schaltenden Strahlventilatoren“ ist in jeder Hinsicht schlechter als die MPC- und die PI-/PID-Regelung, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung (zum Teil längere Anstiegszeiten, grössere Überschwingungen, sowie längere Einschwingzeiten). Es konnte kein gutes „Rezept“ für die Wahl der Abtastzeit gefunden werden. Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit der Regelung dar.

System mit Absaugung: Die Systemantwort bei symmetrischer Regelung hängt entscheidend vom Absaugort ab. Bei Absaugung in der Mitte des Tunnels hat die Regelung wenig bis nichts zu tun (solange keine asymmetrischen Stördrücke vorhanden sind, z.B. Auftrieb oder meteorologische Drücke). Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die steigende Asymmetrie ausgleichen.

In den Simulationen hat die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“ die deutlich schlechteste Regelungsqualität erzielt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass mit einer objektspezifischen Optimierung der „Schrittweisen Berechnung“ ein besseres Verhalten erreicht werden kann.

Gegen die Verwendung von MPC-Reglern sprechen praktische Aspekte: So ist die Verfügbarkeit von MPC-Bausteinen in Simulationssoftware und in der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) nicht immer gegeben. Zudem führt die Komplexität des MPC-Reglers zu neuen Unsicherheiten und damit Risiken.

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall wird empfohlen, standardmässig PI-Regler mit Anti-Windup zu verwenden. Aufgrund der einfachen Struktur, der geringen Anzahl Parameter, der Unabhängigkeit vom Brandort und der guten Regelleistung überwiegen die Vorteile der PI-Regelung gegenüber der MPC-Regelung. Wegen der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren in Tunneln ist ein Anti-Windup unerlässlich.

Unabhängig vom verwendeten Regler ist für eine schnelle Regelung entscheidend, dass genügend Lüfterkapazität vorhanden ist. Die benötigte Anzahl Strahlventilatoren während der Regelung kann die Anzahl der erforderlichen Strahlventilatoren im eingeregelteten Zustand erheblich übersteigen. Die Tunnellüftung wird jedoch in der Regel für einen stationären Zustand ausgelegt. Dies hat zur Folge, dass im worst-case Szenario dann möglicherweise die Regelung aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren verlangsamt wird.

## Résumé

Dans le présent projet de recherche, les méthodes suivantes de contrôle du courant d'air en cas d'incendie sont étudiées et comparées:

- Régulation PI et PID
- Model Predictive Control (régulation MPC)
- Régulation basée sur un modèle (Calcul pas à pas des ventilateurs de jet à actionner)

La régulation MPC est plus rapide que toutes les autres méthodes de régulation examinées, mais elle est complexe, avec un grand nombre de paramètres à fixer. Le choix du logiciel de simulation est fortement limité. Lors d'une aspiration de fumées, le lieu d'incendie doit être inclus dans le modèle interne, ce qui augmente encore la complexité du contrôle.

Les régulations PI et PID ne sont pas aussi rapides que la régulation MPC. Le temps de montée et le dépassement sont comparables à ceux de la MPC, mais le temps d'établissement est plus élevé. Les régulations PI et PID sont nettement plus rapides que le "calcul pas à pas", aussi bien pour les systèmes à ventilation longitudinale que pour les systèmes avec aspiration de fumées. Les régulations PI et PID sont indépendantes du lieu d'incendie. Ces régulations sont disponibles dans pratiquement tous les logiciels de simulation. Dans le cas contraire elles peuvent être aisément créées à partir de blocs mathématiques. L'inclusion de la partie D d'un régulateur PID peut mener à des problèmes avec les signaux entrants réels. En conséquence, le régulateur PI n'a que des avantages face au régulateur PID (dépassement plus faible, 2 paramètres seulement).

Le "calcul pas à pas des ventilateurs de jet à actionner" est dans tous les cas plus mauvais que les régulations MPC et PI/PID, aussi bien pour les systèmes à ventilation longitudinale que pour les systèmes avec aspiration de fumées (temps de montée parfois plus long, dépassement et temps d'établissement plus élevés). Aucune bonne "recette" pour la sélection de la période d'échantillonnage n'a pu être définie. La sélection de la période d'échantillonnage est un compromis entre le temps de montée d'une part et le temps d'établissement et le dépassement d'autre part.

Systèmes avec aspiration de fumées: La réponse du système dans le contrôle symétrique dépend du lieu d'aspiration. Lors d'une aspiration au milieu du tunnel, le contrôle n'a que peu voire rien à faire (tant qu'aucune différence de pression asymétrique n'est en place, due par exemple à des pressions météorologiques ou à un tirage thermique). Plus le lieu d'aspiration est proche des portails, plus fortement le contrôle doit compenser l'asymétrie croissante.

Dans les simulations, le "calcul pas à pas des ventilateurs de jet" a nettement fourni la plus mauvaise qualité de régulation. Il ne peut toutefois pas être exclu qu'un comportement plus efficace puisse être atteint grâce à une optimisation spécifique à l'objet du "calcul pas à pas".

Des aspects pratiques parlent en défaveur de la régulation MPC: les blocs MPC ne sont pas toujours disponibles dans les logiciels de simulation et dans les Commandes par Programme Enregistré (CPE). De plus, la complexité de la régulation MPC mène à de nouvelles incertitudes et donc à des risques.

Pour le contrôle du courant d'air longitudinal en cas d'incendie, l'utilisation d'un contrôle PI avec anti-emballement (anti-windup) est recommandée par défaut. En raison de la structure simple, du faible nombre de paramètres, de l'indépendance du lieu d'incendie et de la bonne performance de régulation, les avantages de la régulation PI surpassent ceux de la régulation MPC. A cause du nombre limité de ventilateurs de jet dans le tunnel, l'utilisation d'anti-emballement (anti-windup) est impérative.

Il est décisif pour une régulation rapide qu'une capacité suffisante de ventilation soit disponible. Le nombre de ventilateurs de jet demandé durant la régulation peut dépasser largement le nombre de ventilateurs de jet requis à l'état établi. Cependant la ventilation du tunnel normalement est dimensionnée pour un état stationnaire. En conséquence, dans le scénario le plus défavorable, il est ainsi possible que la régulation soit ralentie à cause du nombre limité de ventilateurs de jet disponibles.

## Summary

In the present research project, the following control methods for closed-loop control of longitudinal airflow in case of fire are researched and compared:

- PI- and PID-Control
- Model Predictive Control (MPC-Control)
- Model-based Control (Stepwise calculation of jet fans to be switched)

MPC is faster than all other examined controllers. But it is complex, with a large number of parameters to be defined. The availability of simulation-software is strongly limited. For systems with smoke-extraction, the location of the fire has to be included into the model, which leads to additional complexity of the controller.

PI- and PID-Control is not as fast as MPC. Rise-time and Overshoot are similar to MPC, but the settling-time is extended. PI- and PID-Control are clearly faster than “Stepwise calculation”, with both systems longitudinal ventilation and extraction. PI- and PID-Control are independent of the location of the fire. The controllers are present in almost every simulation-software. Otherwise they can be simply created with mathematical elements. The inclusion of the D-Part of the PID-Controller can lead to problems with real input-signals. Thus the PI-Controller only has advantages against the PID-Controller (smaller overshoot, only 2 parameters).

“Stepwise Calculation of jet fans to be switched” appears worse than MPC- and PI-/PID-Control in every way, with both systems longitudinal ventilation and extraction (partly longer rise times, larger overshoots, as well as longer settling times). No good “recipe” could be found for the selection of the sampling time. The selection of the sampling time is a compromise between rise-time and overshoot/settling time of the control.

System with extraction: The system response to symmetrical control depends on the location of the extraction. With extraction in the middle of the tunnel, the control has little or nothing to do (as long as no asymmetrical disturbance-pressures are present, e.g. buoyancy or meteorological pressures). With the extraction closer to the portals, the controller has to compensate the increasing asymmetry.

In the simulations, the “stepwise calculation of jet fans” has clearly shown the worst control-quality. However, it can not be excluded that with an object-specific optimisation of “stepwise calculation” a better reaction can be achieved.

Practical aspects speak against the use of MPC-controllers: MPC-blocks are not always available in simulation-software and Programmable Logic Controller (PLC). Moreover the complexity of the MPC-Controller leads to new uncertainties and by that to risks.

For the control of longitudinal airflow in case of fire, the use of PI-controller with Anti-Windup is recommended by default. On the basis of the simple structure, the low number of parameters, the independence of the location of the fire and the good quality of the control, the advantages of the PI-Controller outweigh against the MPC-Controller. Because of the limited number of jet fans in tunnels, the use of Anti-Windup is imperative.

For a fast control, it is crucial that sufficient ventilation capacity is available, independently of the used controller. The requested number of jet fans during the dynamic control may significantly exceed the required number of jet fans in the settled state. However, the tunnel ventilation is usually designed for steady-state. As a consequence, the control will be slowed down in the worst-case szenario because of the limited number of jet fans.

## Kurzfassung

### Ziele des Forschungsprojekts

Im Forschungsantrag wurden die folgenden Projektziele angegeben:

- Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit in Strassentunneln
- Bestimmung und Vergleich verschiedener Regelungsstrategien zur Kontrolle der Luftströmung im Strassentunnel im Brandfall
- Entwicklung einer robusten Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung.

### Methodik

Die Arbeit ist weitgehend theoretisch. Die Dynamik der Regelstrecke, bestehend aus Tunnel, Strahlventilatoren und Strömungsmessung wird mit mathematischen Modellen beschrieben. Die verschiedenen Regelungen werden anhand numerischer Simulationsprogramme getestet und miteinander verglichen.

### Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden die folgenden Regelungen für die Kontrolle der Längsströmung im Brandfall untersucht und verglichen:

- Klassische Regelung (PI- und PID-Regelung)
- Model Predictive Control (MPC-Regelung)
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden Strahlventilatoren“)

Diese Methoden können grundsätzlich für Tunnel mit Längs-, Quer- oder Halbquerlüftung sowie bei lokaler Rauchabsaugung angewendet werden.

Für das System Längslüftung wurden folgende Regelungen untersucht und verglichen:

- PI-/PID-Regelung
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)
- MPC-Regelung

Für das System mit Absaugung wurden folgende Regelungen untersucht und verglichen:

- PI-/PID-Regelung
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)

Als Beispieeltunnel für die Simulationen wird der Tunnel Gotschna verwendet:

- 4200m Länge
- 24 Strahlventilatoren
- Lokale Absaugung im Brandfall

In Kapitel 12 wird ein Rezept beschrieben, um eine robuste Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung herzuleiten.

### Regelungsziele gemäss Schweizer Richtlinie [1]

Gemäss Merkblatt „Funktionen der Lüftungssteuerung“ der Schweizer Richtlinie [1] muss die Längsströmung in folgenden Fällen geregelt werden:

		Ohne Absaugung	Mit Absaugung
<b>Richtungsverkehr ohne Stau</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	Keine Kontrolle
	Hauptalarm	$\geq 3$ m/s in Fahrtrichtung	$\geq 3$ m/s in Fahrtrichtung
<b>Richtungsverkehr mit Stau</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr
	Hauptalarm	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr	Symmetrische Zuströmung

<b>Gegenverkehr</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	Keine Kontrolle
	Hauptalarm	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr	Symmetrische Zuströmung

Tabelle 1 Vorgabe gemäss Merkblatt „Funktionen der Lüftungssteuerung“ [1]

Zusammengefasst gibt es die folgenden Ziele der Regelung:

- Ohne Absaugung
  - 1 m/s in Fahrtrichtung
  - 3 m/s in Fahrtrichtung
- Mit Absaugung
  - 3 m/s in Fahrtrichtung
  - Symmetrische Zuströmung

Beim System mit Längslüftung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$  geregelt.

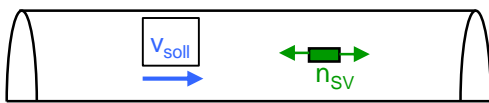


Abbildung 1 Regelungsziel beim System Längslüftung: Regelung auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit

Bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr wird bei Systemen mit Absaugung gemäss [1] auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

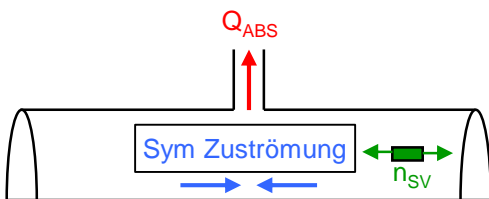


Abbildung 2 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr: Symmetrische Anströmung zur Absaugstelle

Bei Richtungsverkehr ohne Stau wird bei Systemen mit Absaugung gemäss [1] die Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts von der Absaugstelle in Verkehrsrichtung auf einen Sollwert geregelt.

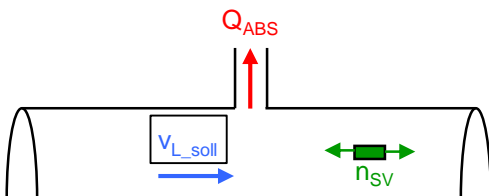


Abbildung 3 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr ohne Stau: Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

## Modellierung

Im Rahmen der Modellierung werden die wesentlichen Zusammenhänge des Regelungskreises definiert. Für den Tunnel mit Längslüftung wurden ausgehend von der Zusammenstellung der Differentialgleichungen für die Dynamik des Tunnels, der Strahlventilatoren und der Strömungsmessung mehrere lineare Näherungsmodelle entwickelt und verglichen.

- Die Dynamik der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird durch eine nicht-lineare Differentialgleichung beschrieben. Als Näherungsmodell kann ein linearisiertes Modell verwendet werden. Alternativ kann der Tunnel einem Tiefpass 1. Ordnung (PT1) angenähert werden.
- Die Dynamik der Strahlventilatoren lässt sich durch einen Tiefpass 1. Ordnung (PT1) oder durch eine Totzeit beschreiben.
- Die Filterung der Strömungsmessung wird durch ein Tiefpass 1. Ordnung (PT1) modelliert. Die zeitliche Verzögerung der Messfilterung kann auch durch eine Totzeit beschrieben werden.

Das System aus Strahlventilatoren, Tunnel und Strömungsmessung kann durch Kombination der einzelnen Modelle beschrieben werden.

Folgende linearen Näherungsmodelle eignen sich für die Beschreibung der Dynamik des Systems Längslüftung (Strahlventilatoren und Tunnel):

- Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV als Totzeit)
- Linearisiertes System LL PT2 (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1)
- Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1)

## PI- und PID-Regelung

Für die Regelung der Längslüftung mit einem PI- oder PID-Regler eignen sich die Einstellparameter nach Ziegler/Nichols.

Um diese herzuleiten, wird die Regelstrecke einem Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (PT1TZ-Glied) angenähert. Mit der Sprungantwort der Regelstrecke werden die statische Verstärkung, die Zeitkonstante und die Totzeit bestimmt.

## MPC-Regelung

Ein MPC-Regler verfügt intern über ein vollständiges Modell der Prozessdynamik mit allen Verkopplungen zwischen den Steuer- und Regelgrößen. Mit Hilfe des internen Modells kann er ein Stück „in die Zukunft schauen“, d.h. Vorhersagen („Prädiktionen“) über einen bestimmten Zeithorizont machen.

Das interne Modell des MPC-Reglers muss durch ein lineares Modell des Systems beschrieben werden, welches den Tunnel, die Strahlventilatoren als auch die Filterung der Strömungsmessung beinhaltet. Es werden die folgenden linearen Näherungsmodelle untersucht:

- Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV und Messung als Totzeit)
- Linearisiertes System LL PT2 (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV und Messung kombiniert als PT1)
- Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV und Messung kombiniert als PT1)
- Linearisiertes System LL PT3 (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1, Messung als PT1)
- Tiefpass 3. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1, Messung als PT1)

## Schrittweise Berechnung der SV (Modellbasierte Regelung)

In konstanten Zeitschritten werden die theoretische Soll-Anzahl der SV und die theoretische Ist-Anzahl der SV berechnet. Die SV-Differenz (positiv oder negativ) wird dann entsprechend zu der aktuellen Anzahl SV zu- oder weggeschaltet.

## Vergleich verschiedener Regelungen System Längslüftung

Abbildung 4 zeigt verschiedene Regelungen des Systems Längslüftung. Die Strömungsgeschwindigkeit wird auf einen Sollwert von 1 m/s geregelt.

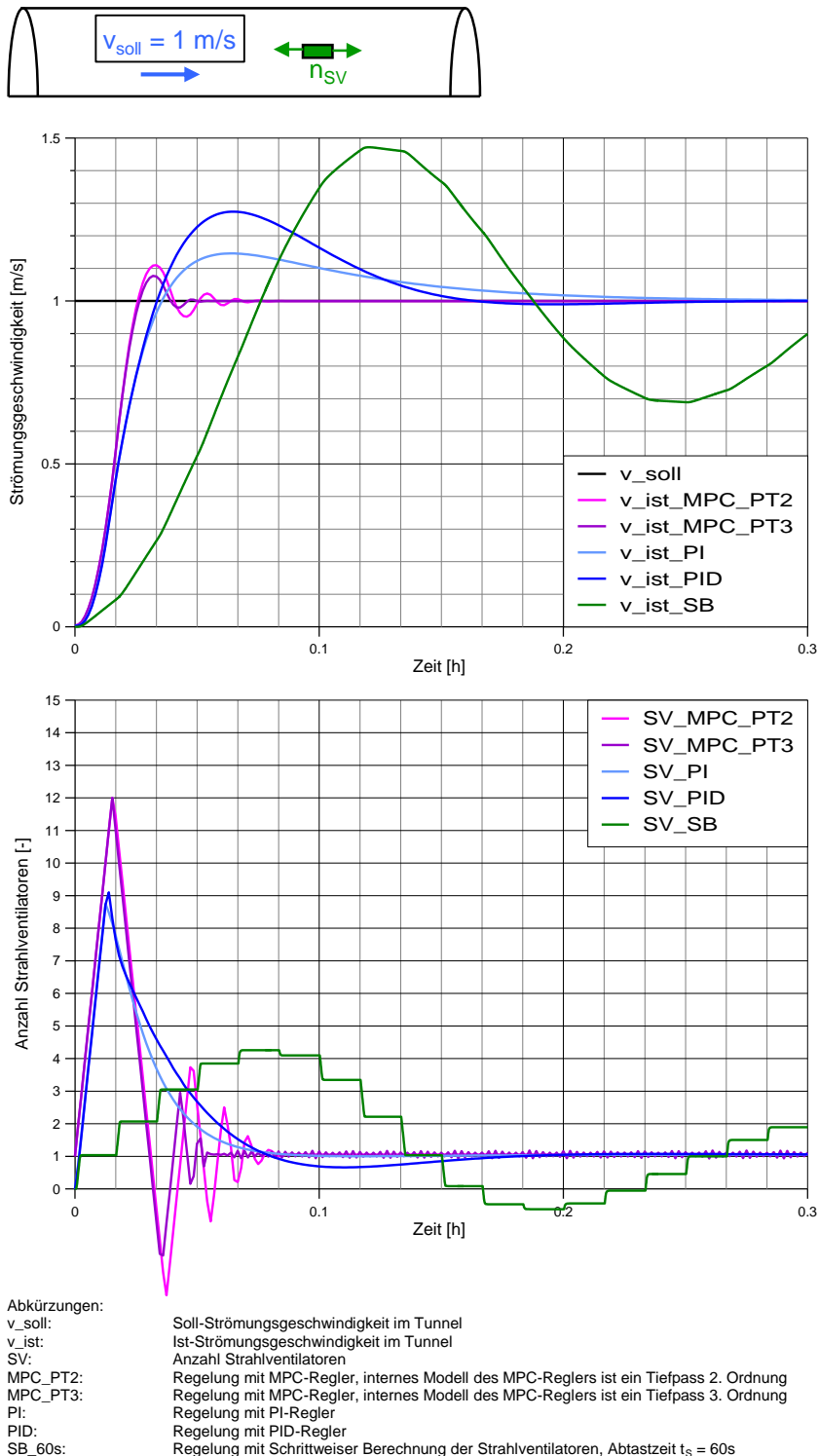


Abbildung 4 Vergleich zwischen PID-, MPC-Regelung und „Schrittweiser Berechnung der SV“ bei Regelung des Systems Längslüftung auf 1 m/s

Abbildung 5 zeigt verschiedene Regelungen des Systems Längslüftung. Die Strömungsgeschwindigkeit wird auf einen Sollwert von 3 m/s geregelt.

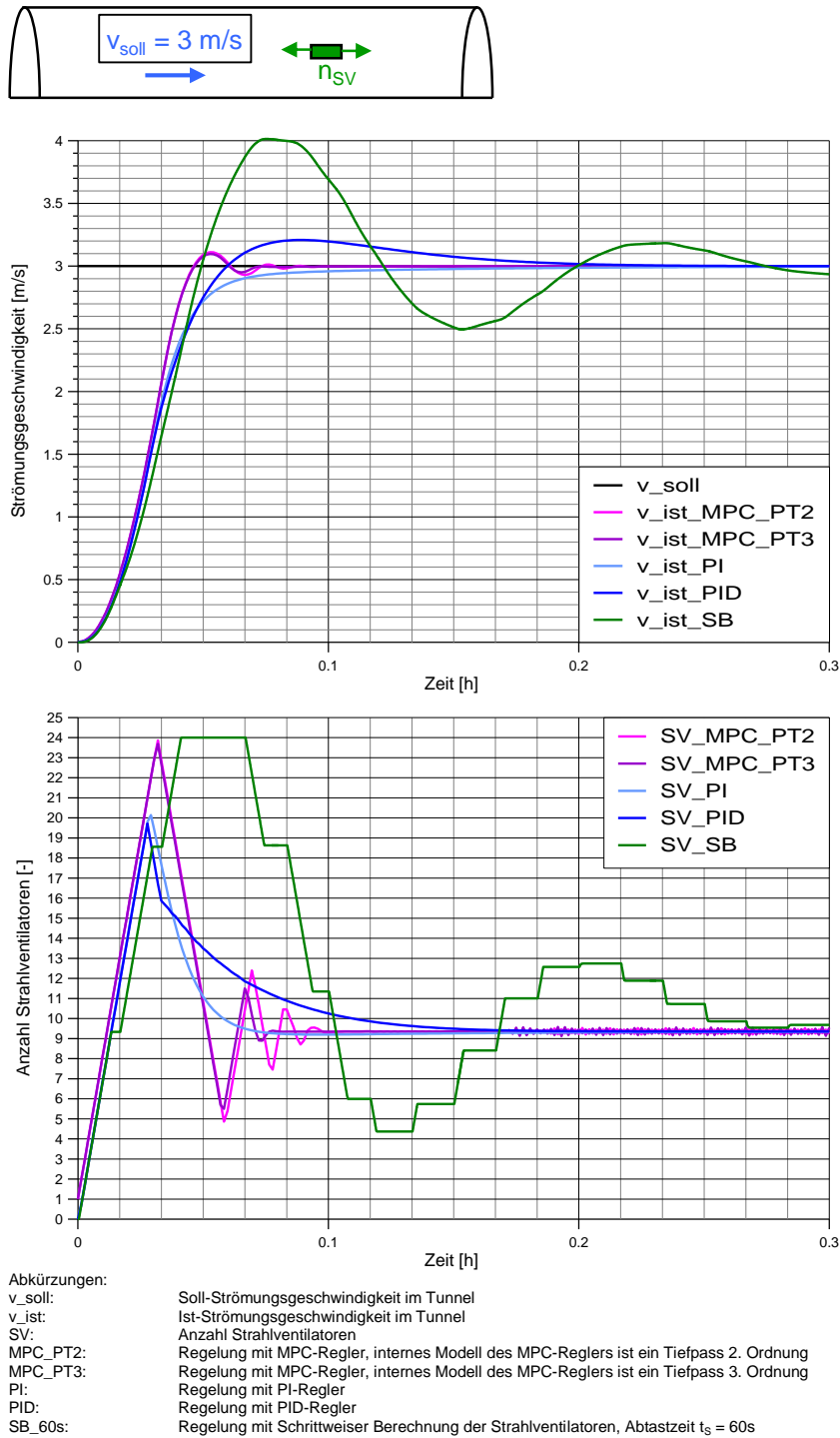


Abbildung 5 Vergleich zwischen PID-, MPC-Regelung und „Schrittweiser Berechnung der SV“ bei Regelung des Systems Längslüftung auf 3 m/s

## Vergleich verschiedener Regelungen System Absaugung, Symmetrische Regelung

Abbildung 6 zeigt verschiedene Regelungen des Systems mit Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m). Es wird auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

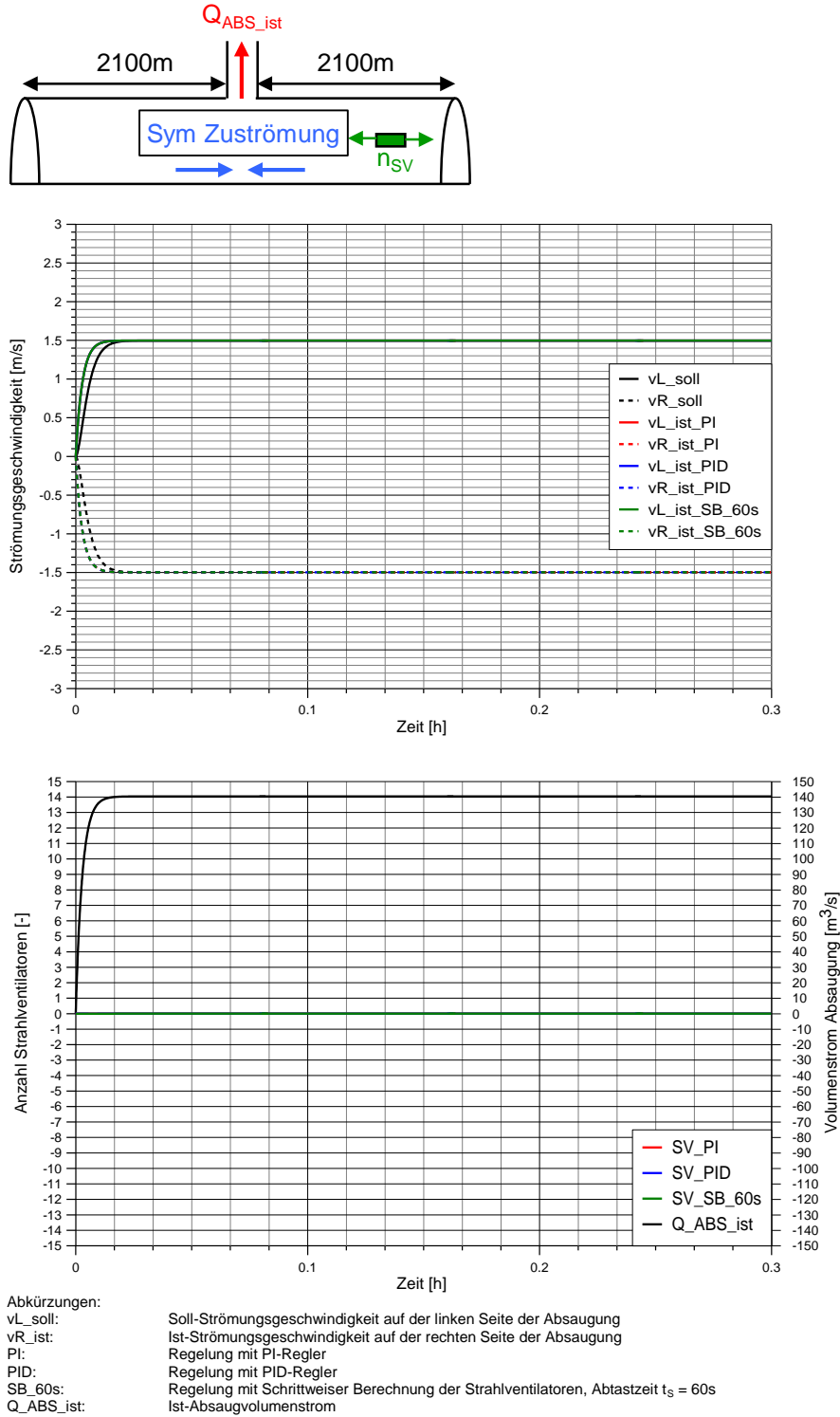


Abbildung 6 Vergleich zwischen PI-/PID-Regelung und „Schrittwiseiger Berechnung der SV“ bei symmetrischer Regelung des Systems mit Absaugung in der Mitte des Tunnels (2100m)

Bei Absaugung in der Mitte des Tunnels zeigen sich keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Regelungen (Die Kurven der verschiedenen Regelungen liegen übereinander). Weder bei der PI-/PID-Regelung noch bei der „schrittweisen Berechnung der Anzahl SV“ werden Strahlventilatoren benötigt.

Abbildung 7 zeigt verschiedene Regelungen des Systems mit Absaugung 200m ab linkem Portal. Es wird auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

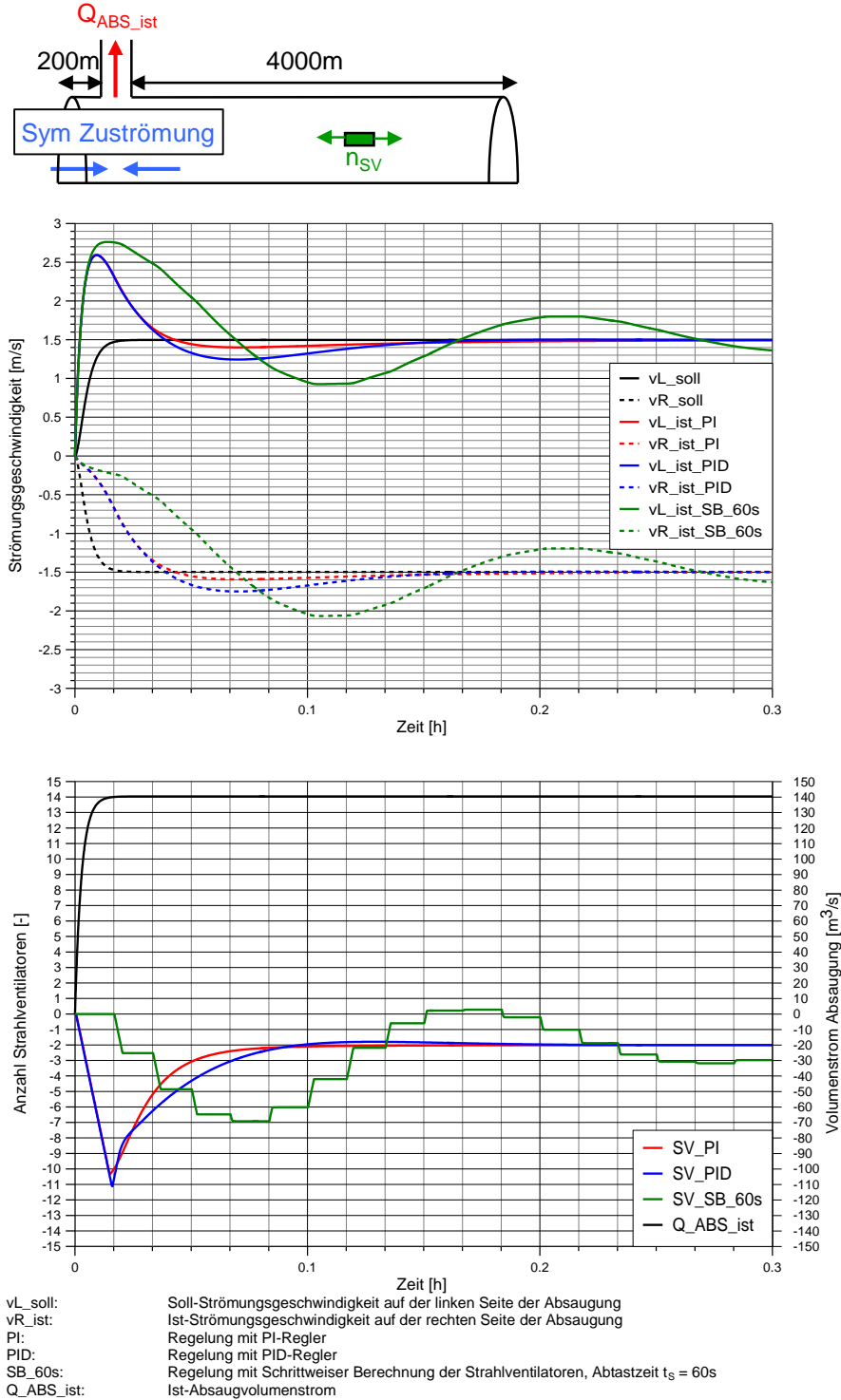
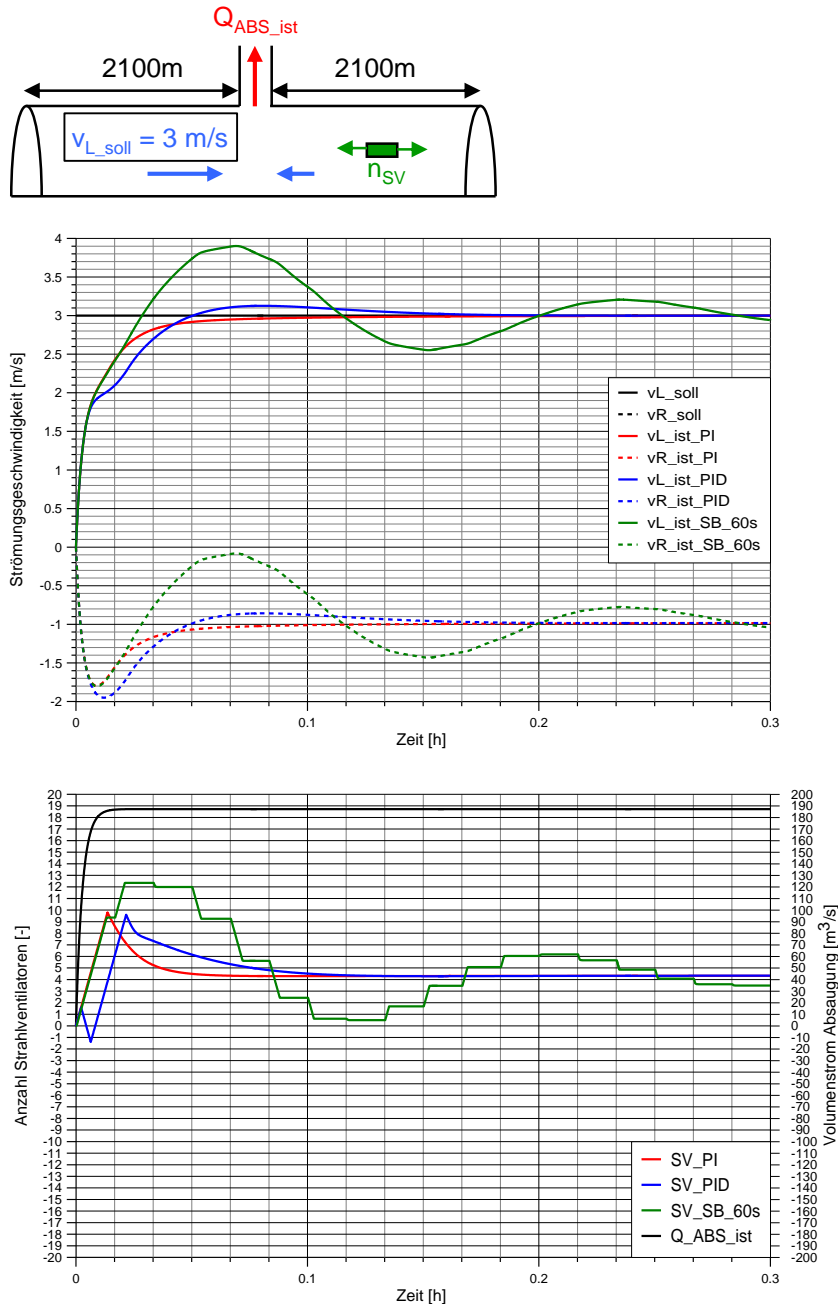


Abbildung 7 Vergleich zwischen PID-Regelung und „Schrittweiser Berechnung der SV“ bei symmetrischer Regelung des Systems mit Absaugung 200m vom linken Portal

## Vergleich verschiedener Regelungen System Absaugung, Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

Abbildung 8 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit verschiedenen Regelungen.



Abkürzungen:  
 $v_{L\_soll}$ : Soll-Strömungsgeschwindigkeit auf der linken Seite der Absaugung  
 $v_{R\_ist}$ : Ist-Strömungsgeschwindigkeit auf der rechten Seite der Absaugung  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 PID: Regelung mit PID-Regler  
 SB\_60s: Regelung mit Schrittweiser Berechnung der Strahlventilatoren, Abtastzeit  $t_s = 60s$   
 $Q_{ABS\_ist}$ : Ist-Absaugvolumenstrom

Abbildung 8 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen

Abbildung 9 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen.

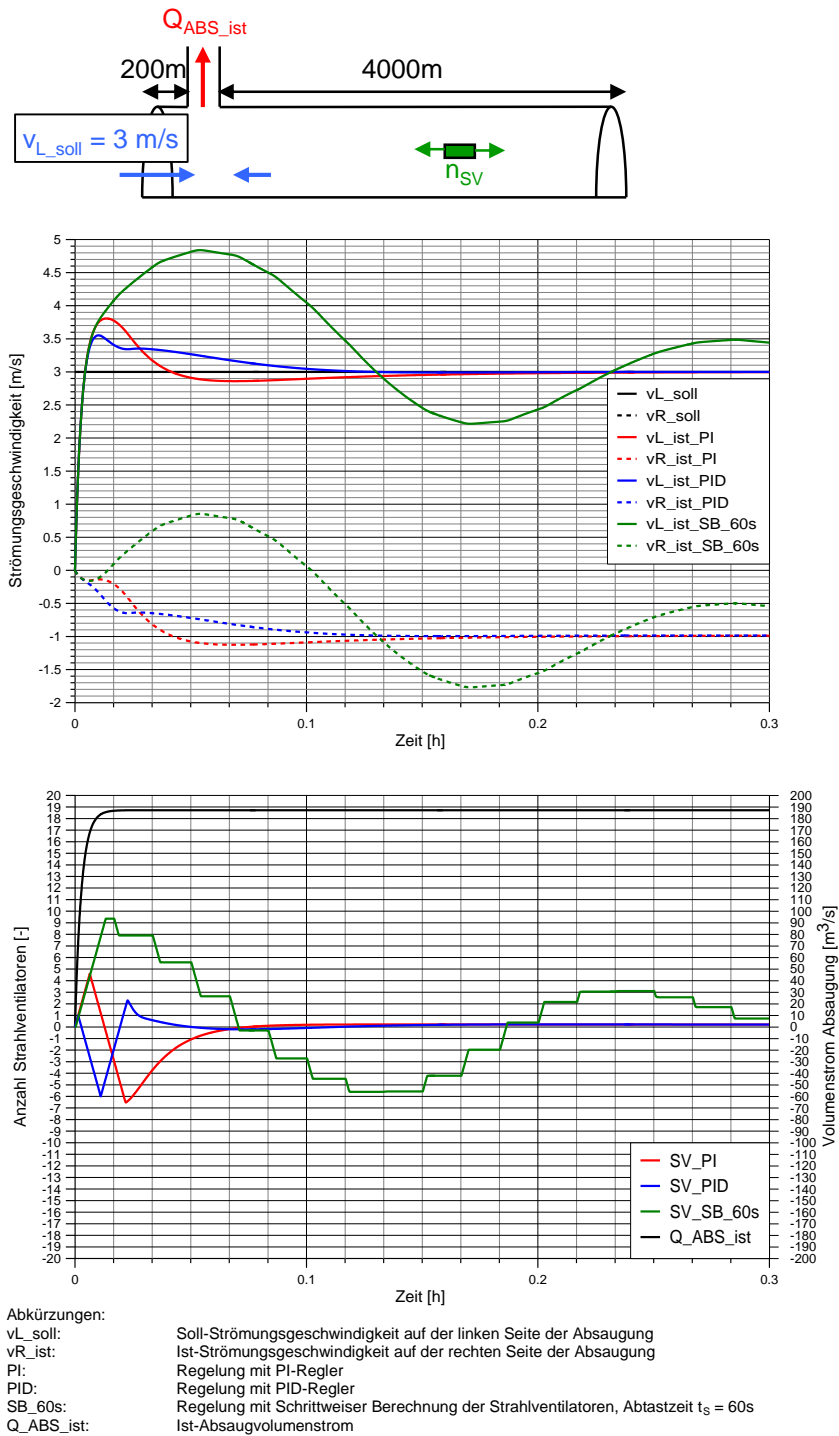
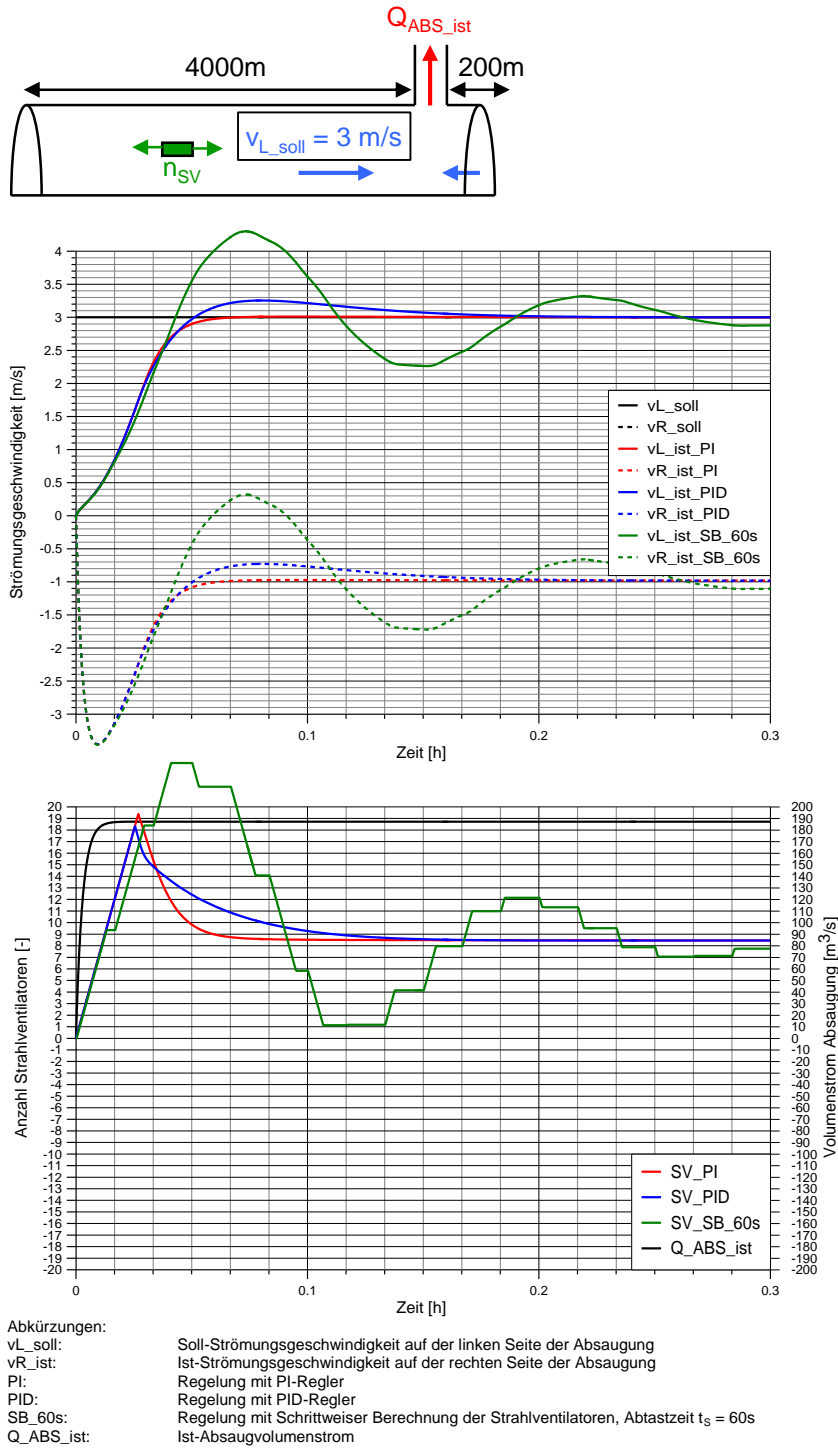


Abbildung 9 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen

Abbildung 10 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen.



Abkürzungen:  
 $v_{L\_soll}$ : Soll-Strömungsgeschwindigkeit auf der linken Seite der Absaugung  
 $v_{R\_ist}$ : Ist-Strömungsgeschwindigkeit auf der rechten Seite der Absaugung  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 PID: Regelung mit PID-Regler  
 SB\_60s: Regelung mit Schrittweiser Berechnung der Strahlventilatoren, Abtastzeit  $t_s = 60s$   
 $Q_{ABS\_ist}$ : Ist-Absaugvolumenstrom

Abbildung 10 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen

## Schlussfolgerungen

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Regelungen zeigt:

MPC-Regelung:

- Die MPC-Regelung ist schneller als alle anderen Regelungen.
- Die MPC-Regelung ist relativ aufwändig
- Es müssen viele Parameter bestimmt werden
- Nicht jede Simulationssoftware verfügt über MPC-Regelung
- Bei Absaugung muss der Brandort in das interne Modell einfließen

PI- und PID-Regelung:

- Sie ist nicht ganz so schnell wie die MPC-Regelung
  - Ähnliche Anstiegszeit wie MPC-Regelung
  - Ähnliche Überschwingung wie MPC-Regelung
  - Längere Einschwingzeit wie MPC-Regelung
- Sie ist jedoch viel schneller als die „Schrittweise Berechnung der SV“, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung
- PI- und PID-Regler sind unabhängig vom Brandort
- Praktisch in jeder Simulationssoftware sind PI- und PID-Regler vorhanden. Und wenn nicht können sie sehr schnell aus mathematischen Bausteinen modelliert werden.
- Der Einbezug des D-Anteils beim PID-Regler kann bei realen Eingangssignalen zu Problemen führen.
- Der PI-Regler hat gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile
  - Kleinere Überschwingung
  - Nur 2 Parameter

„Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“ (Modellbasierte Regelung):

- Die „Schrittweise Berechnung der Anzahl SV“ ist in allen Belangen schlechter als die MPC- und die PI-/PID-Regelung, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung:
  - Zum Teil längere Anstiegszeit
  - Grössere Überschwingung
  - Längere Einschwingzeit
  - Beim System mit Absaugung zum Teil Strömungsumkehr der Strömungsgeschwindigkeit  $v_R$
- Es gibt kein gutes „Rezept“ für die Wahl der Abtastzeit
- Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit der Regelung dar:
  - Bei grösseren Abtastzeiten ist die Überschwingung kleiner und das System schwingt schneller ein. Dafür dauert die Anstiegszeit länger
  - Bei kleineren Abtastzeiten ist die Anstiegszeit kürzer. Dafür ist die Überschwingung grösser und das System schwingt länger.

Symmetrische Regelung beim System mit Absaugung:

Die symmetrische Regelung hängt entscheidend vom Absaugort ab:

- Bei Absaugung in der Mitte hat die Regelung wenig bis nichts zu tun (solange keine asymmetrischen Stördrücke vorhanden sind, z.B. Auftrieb oder meteorologische Drücke)
- Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die Asymmetrie ausgleichen.

## Empfehlungen

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall wird empfohlen, standardmässig PI-Regler mit Anti-Windup zu verwenden. Aufgrund der einfachen Struktur, der geringen Anzahl Parameter, der Unabhängigkeit vom Brandort und der guten Regelleistung überwiegen die Vorteile gegenüber der MPC-Regelung. Aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren in Tunneln ist ein Anti-Windup unerlässlich.

In den Simulationen hat die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“ die deutlich schlechteste Regelungsqualität erzielt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass mit einer objektspezifischen Optimierung der „Schrittweisen Berechnung“ ein besseres Verhalten erreicht werden kann.

Gegen die Verwendung von MPC-Reglern sprechen praktische Aspekte: So ist die Verfügbarkeit von MPC-Bausteinen in Simulationssoftware und in der SPS-Programmierung nicht immer gegeben. Zudem führt die Komplexität des MPC-Reglers zu neuen Unsicherheiten und damit Risiken.

Unabhängig vom verwendeten Regler ist für eine schnelle Regelung entscheidend, dass genügend Lüfterkapazität vorhanden ist. Die Anzahl Strahlventilatoren während der Regelung übersteigt die Anzahl der Strahlventilatoren am Ende der Regelung bei weitem.

Die Tunnellüftung wird in der Regel für einen stationären Zustand ausgelegt. Im worst-case Szenario wird dann möglicherweise die Regelung aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren verlangsamt.

In den Simulationen wurde vereinfachend angenommen, dass gebrochene Zahlen an Strahlventilatoren geschaltet werden können. Für Tunnel, bei welchen die Strahlventilatoren mit Frequenzumformern angesteuert werden, ist das auch realistisch. Bei Tunneln mit direkt angesteuerten Strahlventilatoren können jedoch immer nur ganze Zahlen geschaltet werden. Je nachdem ob wenig grosse oder viele kleine Strahlventilatoren eingebaut sind, kann nicht mehr fein geregelt werden. Besonders bei grossen Strahlventilatoren kann die Qualität der Regelung verbessert werden, wenn zumindest ein Teil der Strahlventilatoren mit Frequenzumformer angesteuert wird.

## Rezept für eine robuste (PI-) Regelung für Strassentunnel mit oder ohne Absaugung

In Kapitel 12 wird ein Rezept beschrieben nach dem eine robuste (PI-) Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung hergeleitet werden kann.

Als Regler soll ein PI-Regler mit Anti-Windup eingesetzt werden.

Für die Regelung der Längslüftung mit einem PI- oder PID-Regler eignen sich die Einstellparameter nach Ziegler/Nichols. Die Regelparameter werden nach der Sprungantwortmethode nach Ziegler/Nichols hergeleitet.

Um diese Regelparameter zu bestimmen, müssen folgende Parameter des Systems bekannt sein:

- Wirkungskonstante  $b_T$  eines Strahlventilators im Tunnel
- Totzeit  $T_{TZ}$  der Regelstrecke

Beide Parameter können aus Systemparametern berechnet bzw. abgeschätzt werden. Die Totzeit des Systems kann zusätzlich durch einen Sprungantwortversuch im Tunnel gemessen werden.

Für die Wirkungskonstante  $b_T$  eines Strahlventilators im Tunnel gilt:

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} = \frac{\Delta F_{1SV\_stand}}{L \cdot \rho \cdot k_{SV} \cdot A_T}$$

Mit:

$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta F_{1SV\_stand}$	Stand Schub eines Strahlventilators	[N]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]

Die Totzeit der Regelstrecke  $T_{TZ}$  setzt sich hauptsächlich aus 3 Totzeiten zusammen:

- Totzeit der Strahlventilatorodynamik
- Totzeit durch die verzögerte Einschaltung aller Strahlventilatoren (SV-Rampe)
- Totzeit der Strömungsmessung

Die gesamte Totzeit ist dann die Summe der 3 Totzeiten:

$$T_{TZ} = T_{SV\_TZ} + T_{mess\_TZ} + T_{R\_TZ\_max}$$

Mit:

$T_{TZ}$	Gesamte Totzeit der Regelstrecke	[s]
$T_{SV\_TZ}$	Totzeit der Strahlventilatorodynamik	[s]
$T_{mess\_TZ}$	Totzeit der Messfilterung der Strömungsmessung	[s]
$T_{R\_TZ\_max}$	Maximale Totzeit der Rampenantwort	[s]

Die Totzeit der Strahlventilatoren kann näherungsweise der Zeitkonstante der Strahlventilatorodynamik gleichgesetzt werden. Diese beträgt in der Regel einige Sekunden (üblicherweise ca. 5 s).

Die Totzeit der Filterung der Strömungsmessung kann näherungsweise der Zeitkonstante der Messung gleichgesetzt werden (im Brandfall üblicherweise ca. 10 s).

Die Totzeit durch die verzögerte Einschaltung aller Strahlventilatoren (maximale Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ\_max}$ ) wurde in Kapitel 7.5.3 hergeleitet. Es gilt:

$$T_{R\_TZ\_max} = \frac{\tau_{T\_min} - (T_{R\_max} + \tau_{T\_min}) \cdot e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}}{\left(1 - e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}\right)}$$

Mit:

$T_{R\_TZ\_max}$	Maximale Totzeit der Rampenantwort	[s]
$\tau_{T\_min}$	Minimale Zeitkonstante des leeren Tunnels	[s]
$T_{R\_max}$	Maximale Zeitdauer der Einschalt-Rampe der SV	[s]

Für die maximale Zeitdauer der Einschalt-Rampe  $T_{R\_max}$  der SV gilt:

$$T_{R\_max} = n_{SV\_max} \cdot T_{SV\_SZ}$$

Mit:

$T_{R\_max}$	Maximale Zeitdauer der Einschalt-Rampe der SV	[s]
$n_{SV\_max}$	Maximale Anzahl Strahlventilatoren	[-]
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit zwischen dem Einschalten mehrerer Strahlventilatoren	[s]

Für die minimale Zeitkonstante des leeren Tunnels gilt:

$$\tau_{T\_min} = \frac{1}{\sqrt{a_{T\_Leer} \cdot b_T \cdot n_{SV\_max}}}$$

Mit:

$\tau_{T\_min}$	Minimale Zeitkonstante des leeren Tunnels	[s]
$a_{T\_Leer}$	Widerstandskonstante des leeren Tunnels	[1/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$n_{SV\_max}$	Maximale Anzahl Strahlventilatoren	[-]

Für die Konstanten  $a_{T\_Leer}$  gilt:

$$a_{T\_Leer} = \frac{\left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} \right)}{2 \cdot L}$$

Mit:

$a_{T\_Leer}$	Widerstandskonstante des leeren Tunnels	[1/m]
$\kappa_P$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals	[-]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]

Die Totzeit der Regelstrecke kann im realen Tunnel zusätzlich durch ein Sprungantwortversuch bestimmt werden:

- Zur Zeit  $t < 0$  sind alle Strahlventilatoren ausgeschaltet
- Zum Zeitpunkt  $t = 0$  werden alle SV eingeschaltet
- Für die Zeit  $t > 0$  wird der resultierende Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit gemessen

Abbildung 11 zeigt den qualitativen Verlauf eines solchen Sprungantwortversuchs.

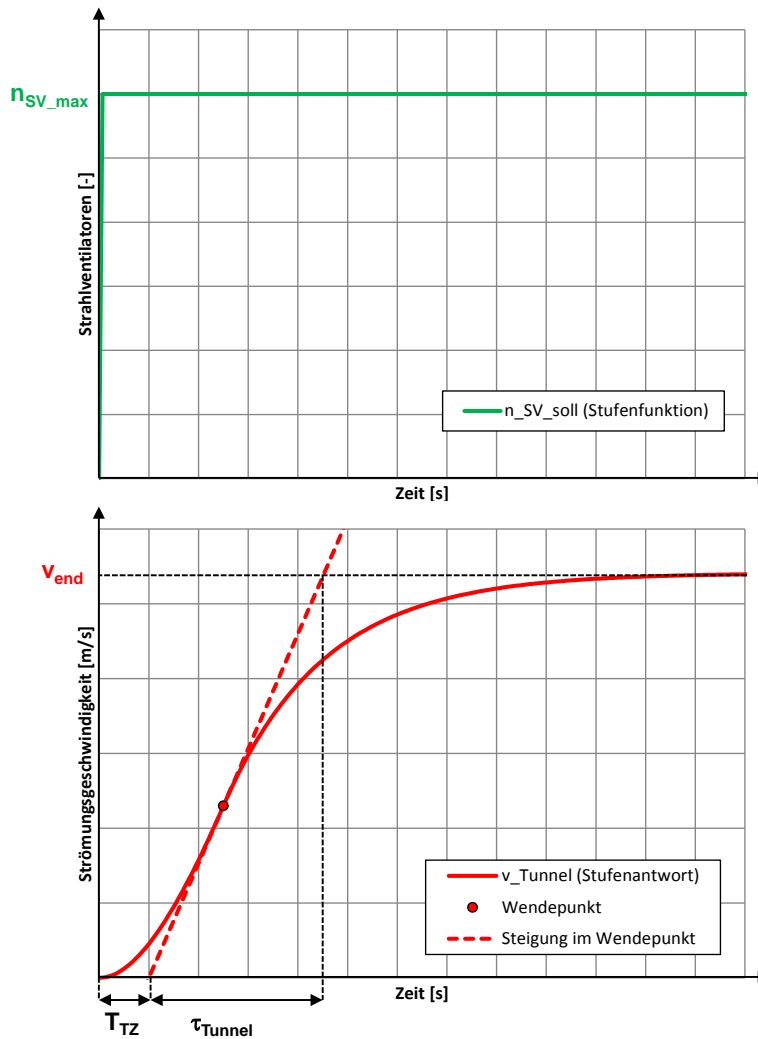


Abbildung 11 Sprungantwort mit Wendetangente zur Bestimmung von  $T_{TZ}$  und  $\tau_{Tunnel}$

Für die Regelparameter des PI-Reglers ergibt sich nach Ziegler/Nichols:

$$K_{PI,P} = 0,9 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$$

$$T_{PI,I} = 3,33 \cdot T_{TZ}$$

Mit:

$K_{PI,P}$	Verstärkung des PI-Reglers	[s/m]
$T_{PI,I}$	Nachstellzeit des I-Anteils des PI-Reglers	[s]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$T_{TZ}$	Gesamte Totzeit der Regelstrecke	[s]

Für den Anti-windup hat sich folgende Zeitkonstante als geeignet erwiesen:

$$T_{PID,aw} = T_{PI,aw} = 5 \text{ s}$$

Mit:

$T_{PI,aw}$	Zeitkonstante des Anti-Windup	[s]
-------------	-------------------------------	-----

## Mögliche Weiterführung des Forschungsprojekts

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind überwiegend theoretisch. In der Theorie funktioniert der PI-Regler besser als die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“. Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts sollte die Theorie in der Praxis (an einem realen Tunnel) umgesetzt und getestet werden. In der Praxis kommen viele Probleme hinzu, welche in der Theorie vernachlässigt oder vereinfacht wurden.

Ein grosses Problem in der Praxis ist die Plausibilität der Strömungsmessung. Wie soll die Regelung reagieren, falls während des Regelungsprozesses die Plausibilität der Strömungsmessung nicht mehr gegeben ist?

Bei direkt angetriebenen Strahlventilatoren können nur ganze Zahlen geschaltet werden. Falls ein Regler aber eine gebrochene Anzahl Strahlventilatoren verlangt, so führt das im eingeregelteten Zustand zu wiederholtem Ein- und Ausschalten von einem oder mehreren Strahlventilatoren. Sind die Abstände für das Ein- und Ausschalten zu kurz, kann das zu einer Überlastung und somit zur Abschaltung von Strahlventilatoren führen. Diese Problematik sollte weiter untersucht und steuerungstechnisch gelöst werden.

Die Regelungsproblematik bei direkt angetriebenen Strahlventilatoren wirft die Frage auf, ob nicht grundsätzlich Frequenzumformer für die Ansteuerung verwendet werden sollen. Bei Tunneln mit grossen Strahlventilatoren und einer eher geringen Anzahl werden bereits heute Frequenzumformer eingesetzt.



# 1 Ausgangslage

## 1.1 Ziele des Forschungsprojekts

Im Forschungsantrag wurden die folgenden Projektziele angegeben:

- Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit in Strassentunneln
- Bestimmung und Vergleich verschiedener Regelungsstrategien zur Kontrolle der Luftströmung im Strassentunnel im Brandfall
- Entwicklung einer robusten Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden die folgenden Regler für die Anwendung bei der Kontrolle der Längsströmung untersucht bzw. verglichen:

- Klassische Regelung (PI- und PID-Regler)
- Model Predictive Control (MPC)
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)

Diese Methoden können grundsätzlich für Tunnel mit Längs-, Quer- oder Halbquerlüftung sowie bei lokaler Rauchabsaugung angewendet werden.

Für das System Längslüftung wurden folgende Regelungen untersucht und verglichen:

- PI-/PID-Regelung
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)
- MPC-Regelung

Für das System mit Absaugung wurden folgende Regelungen untersucht und verglichen:

- PI-/PID-Regelung
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)

Als Beispieeltunnel für die Simulationen wird der Tunnel Gotschna verwendet:

- 4200m Länge
- 24 Strahlventilatoren
- Lokale Absaugung im Brandfall

In Kapitel 12 wird ein Rezept beschrieben, um eine robuste Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung herzuleiten.

In Kapitel 13 wird in einer kleinen Sensitivitätsanalyse die PI-Regelung an unterschiedlichen Tunneln untersucht, sowie die PI-Regelung mit sinusförmigen Stördrücken getestet.

Die Ziele wurden erreicht. Die Arbeit ist überwiegend theoretisch. Die Auswirkungen der Ergebnisse auf die praktische Anwendung werden in einem folgenden Forschungsprojekt oder in der zukünftigen Projektierung erfolgen.

## 1.2 Vorgabe der Schweizer Richtlinie [1] an die Ereignislüftung

Die Ereignislüftung in Strassentunneln soll gemäss der ASTRA-Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ und der nachgeordneten Merkblätter [1] die Selbstrettung der Tunnelbenutzer unterstützen. Dazu ist die Rauchausbreitung zu kontrollieren.

Gemäss Merkblatt „Funktionen der Lüftungssteuerung“ der Schweizer Richtlinie [1] muss die Längsströmung in folgenden Fällen geregelt werden:

		Ohne Absaugung	Mit Absaugung
<b>Richtungsverkehr ohne Stau</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	Keine Kontrolle
	Hauptalarm	≥3 m/s in Fahrtrichtung	≥3 m/s in Fahrtrichtung
<b>Richtungsverkehr mit Stau</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr
	Hauptalarm	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr	Symmetrische Zuströmung
<b>Gegenverkehr</b>	Voralarm	Keine Kontrolle	Keine Kontrolle
	Hauptalarm	1 m/s in Fahrtrichtung ohne Strömungsumkehr	Symmetrische Zuströmung

Tab. 1.1 Vorgabe gemäss Merkblatt „Funktionen der Lüftungssteuerung“ [1]

Zusammengefasst gibt es die folgenden Ziele der Regelung:

- Ohne Absaugung
  - 1 m/s in Fahrtrichtung
  - 3 m/s in Fahrtrichtung
- Mit Absaugung
  - 3 m/s in Fahrtrichtung
  - Symmetrische Zuströmung

Es wird jedoch nicht vorgegeben, wie schnell der geforderte Strömungszustand erreicht werden muss. Auch der Übergang zwischen natürlicher, gesteuerter und geregelter Lüftung ist nicht definiert.

Da der Strömungszustand für die Fluchtchancen der Tunnelbenutzer entscheidend sein kann, soll mittels Regelung die Längsströmung so schnell wie möglich kontrolliert werden. Die Steuerung/Regelung der Lüftung in Normal- und Ereignisbetrieb unterscheidet sich wesentlich durch die charakteristischen Zeitmassstäbe. Im Normalbetrieb wird die Lüftung zur Einhaltung der Luftqualität bzw. Sichtweite im Tunnel betrieben. Charakteristische Zeitmassstäbe für die Veränderung von Schadstoffkonzentrationen liegen in der Grössenordnung zwischen 10 und 30 min. Im Ereignisbetrieb sind die Strömungsverhältnisse in den ersten Minuten für die Personenrettung entscheidend. Die Zeitmassstäbe für die Beeinflussung der Längsströmung sind entsprechend kleiner.

Als Regler werden heute üblicherweise PI- oder PID-Regler, Tabellen bzw. Formeln („Schrittweise Berechnung der SV“) eingesetzt.

- Einsatz von PI- und PID-Reglern: Die Regelung greift sofort nach Branddetektion
- Einsatz von Tabellen: Die Regelung greift nach einer vordefinierten Zeit oder sobald der Verkehr den Tunnel verlassen hat, und die Absaugung den nominellen Zustand erreicht

Bei der Strategie mit Tabellen wird eine Verzögerungszeit vorgesehen, um den Verkehr als dominierende und rasch veränderliche Störgrösse auszuschliessen. Nach der Verzögerungszeit sind die Fahrzeuge zum Stillstand gekommen oder haben den Tunnel verlassen. Dabei besteht das Risiko, dass die Luftströmungsrichtung während der Wartezeit

mehrmals umgekehrt wird. Dies beeinträchtigt die Fluchtbedingungen im Tunnel und soll grundsätzlich vermieden werden.

Die Kontrolle der Längsströmung hängt wesentlich von der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messung der Luftströmung im Tunnel ab. Diese ist erfahrungsgemäss als sehr kritisch einzustufen. Um die Richtigkeit der einzigen Messpunkte zu beurteilen wird ein logischer Plausibilitätstest durchgeführt. In den heute üblichen Steuerungsalgorithmen ist die Strömungsmessung im Normalbetrieb irrelevant. Sie wird nur bei Brandfall detailliert ausgewertet, wenn Rauch und andere Störungen die Messung beeinflussen.

Abb. 1.1 und Abb. 1.2 zeigen einen Standard-Regelungskreis eines Tunnels mit Lüftungsanlage.

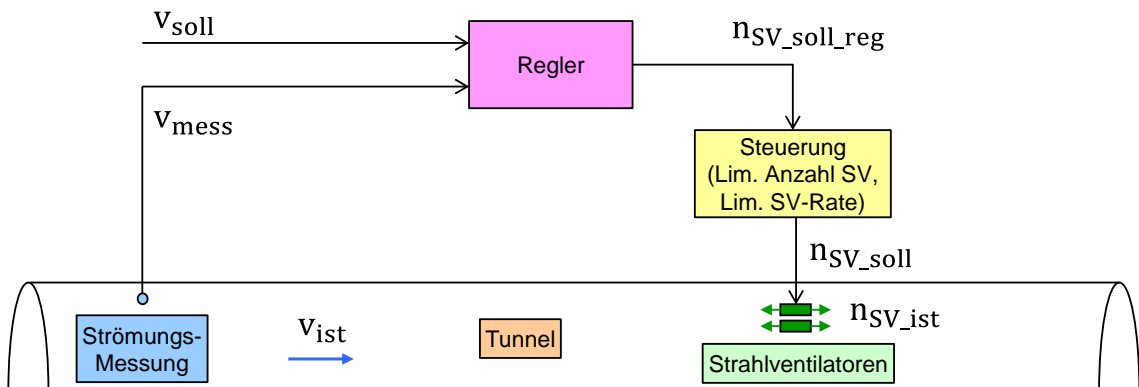


Abb. 1.1 Standard Regelungskreis eines Tunnels mit Lüftungsanlage (schematisch)

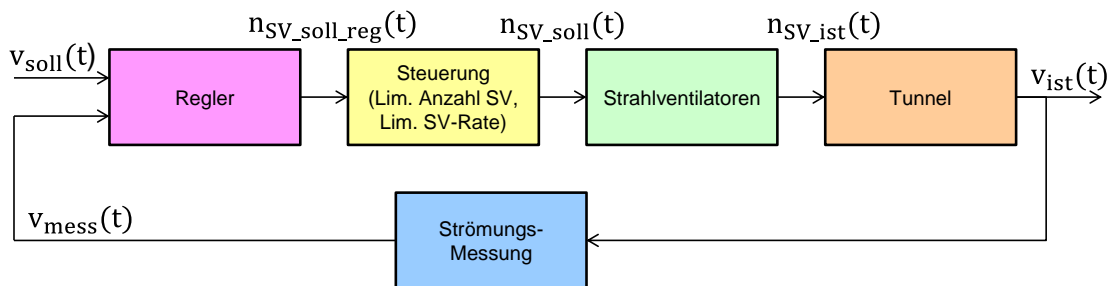


Abb. 1.2 Standard Regelungskreis eines Tunnels mit Lüftungsanlage (Signalflussbild)

Da die Regelung sehr stark von der Qualität der Messung abhängt, werden die Messsignale zeitlich gemittelt. Die Zeitmittelung stellt immer einen Kompromiss dar zwischen einer schnellen Regelung und einer Unterdrückung von kurzfristigen Fluktuationen des Messsignals. Damit erfolgt die Regelung eher langsam. Dieser Ansatz widerspricht dem Ziel der Unterstützung der Selbstrettung. Die Selbstrettung erfolgt in den ersten Minuten nach Brandbeginn. Die Luftströmung im Tunnel wird hingegen erst fünf bis zehn Minuten nach Branddetektion vollständig kontrolliert. Dies heisst, dass gerade in der Selbstrettungsphase der Tunnelbenutzer die Rauchausbreitung unzureichend kontrolliert wird.

Die heute zur Verfügung stehenden Computer und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten der Regelungstechnik erlauben eine schnellere Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit. Dabei können Einflüsse wie z.B. Störungen der Messeinrichtungen und Ventilatoren berücksichtigt werden. Damit wird diese Art der Regelung sehr robust. Sie ermöglicht eine verbesserte (optimierte) Lüftung im Ereignisfall.

### 1.3 Stand der Technik – Regelung der Strömungsgeschwindigkeit in Tunneln

Um den Stand der Technik bezüglich Regelung der Strömungsgeschwindigkeit in Tunneln zu überprüfen, wurde nach Veröffentlichungen zu diesem Thema gesucht. Insbesondere bei folgenden technischen Konferenzen wurden interessante Artikel gefunden:

- BHR Group – Int. Symposium on Aerodynamics And Ventilation of Vehicle Tunnels (1<sup>st</sup> – 14<sup>th</sup> international Symposium)
- Safety in Road and Rail Tunnels - International Conferences
- (1<sup>st</sup> – 5<sup>th</sup> international Conference)
- Tunnel Safety and Ventilation - Symposium Graz
- (1<sup>st</sup> – 5<sup>th</sup> Symposium)

Im Folgenden sind chronologisch einige Arbeiten aufgelistet, welche sich mit Regelung der Strömungsgeschwindigkeit in Tunneln beschäftigen:

1991, A. Mizuno: "An optimal control with disturbance estimation for the emergency ventilation of a longitudinally ventilated road tunnel" [3]

An einem 3000 m langen Richtungsverkehrstunnel in Japan wird eine Regelung („Control with disturbance estimation“) untersucht, welche im Brandfall die Strömungsgeschwindigkeit auf 0 m/s abbremsen soll. Simulationen werden durchgeführt, welche zeigen, dass die verwendete Regelung besser funktioniert als herkömmliche PID-Regelung. Vom Prinzip her handelt es sich um einen P-Regler.

Da es sich vom Prinzip her um einen P-Regler handelt, funktioniert die Regelung nur für das Abbremsen der Strömungsgeschwindigkeit auf 0 m/s. Für das Regeln auf einen bestimmten Wert eignet sich das Prinzip nicht, da ohne Integral-Anteil stets eine bleibende Regelabweichung enthalten sein wird.

1994, T. Yoshimochi, T. Watanabe: "A ventilation control system using fuzzy control for two-way traffic tunnel in highway" [4]

An einem Gegenverkehrstunnel in Japan wird der Normalbetrieb mit Hilfe einer Fuzzy-Regelung untersucht. Sowohl die Luftbelastung als auch die Strömungsgeschwindigkeit werden als Feedback verwendet. Die Fuzzy-Regelung wird mit Simulationen und auch am realen Tunnel getestet. Mit der Fuzzy-Regelung kann ca. 10% Energie gespart werden.

Die Ergebnisse der Studie sind vorwiegend für den Einsatz der Regelung im Normalbetrieb der Lüftung geeignet. Im Normalbetrieb können sowohl die Luftqualität als auch die Strömungsgeschwindigkeit in die Regelung einbezogen werden. Für die Anforderungen des Lüftungsbetriebs im Ereignisfall – Schwerpunkt einer möglichst schnellen Regelung – sind die Ergebnisse jedoch nicht direkt übertragbar.

1998, A. Ichikawa: "The Application of Genetic Algorithms to Road Tunnel Ventilation Control" [5]

„Genetic Algorithms“ werden untersucht, um im Normalbetrieb eine optimale Lüftungskonfiguration zwischen Wirtschaftlichkeit und Luftqualität zu finden.

„Genetic Algorithms“ imitieren den biologischen Evolutionsprozess. Verschiedene Lösungen werden als „künstliche Chromosomen“ dargestellt. In einem Simulator werden die „künstlichen Chromosomen“ mutiert, gekreuzt und immer wieder gegeneinander abgewogen. „Genetic Algorithms“ haben den Vorteil, dass in komplexen Systemen aus einer grossen Anzahl Möglichkeiten (zum Beispiel Lüftungskonfigurationen in einem komplexen Tunnel) die optimale gefunden werden kann.

„Genetic Algorithms“ scheint eine interessante Regelungsmethode für komplexe Tunnel

zu sein, um im Normalbetrieb Wirtschaftlichkeit und Luftqualität abzuwägen. Es ist nicht zu erwarten, dass für die Aufgabe, in einem Standard-Tunnel möglichst schnell auf eine Strömungsgeschwindigkeit zu regeln, mit dem Prinzip der „Genetic Algorithms“ bessere Ergebnisse erzielt werden können.

2001, M.-N. Marsault, J.-M. Apvrille, J.-C. Martin: “Contrôle Commande de la ventilation, Expérimentation logique floue” [6]

An einem vierspurigen Gegenverkehrstunnel (zwei Spuren pro Richtung) mit einer Länge von 1752 m wird eine Fuzzy-Regelung getestet. Die Fuzzy-Regelung soll im Normalbetrieb die Luftqualität sicherstellen.

Die Ergebnisse der Studie sind vorwiegend für den Einsatz der Regelung im Normalbetrieb der Lüftung geeignet. Im Normalbetrieb können sowohl die Luftqualität als auch die Strömungsgeschwindigkeit in die Regelung einbezogen werden. Für die Anforderungen des Lüftungsbetriebs im Ereignisfall – Schwerpunkt einer möglichst schnellen Regelung – sind die Ergebnisse jedoch nicht direkt übertragbar.

2004, P. Pospisil, R. Brandt: “Smoke Control in Road Tunnels”, Papers presented at the conference “Significance of Tunnels in Transport” [7]

In zeitlichen Schritten wird immer wieder die Differenz zwischen gemessener und benötigter Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Mit einem mathematischen Modell des Tunnels wird daraus die nötige Änderung der Anzahl Strahlventilatoren berechnet und in der Steuerung angepasst. Diese Methode wird in verschiedenen Schweizer Tunneln zur Regelung der Längsströmung im Brandfall verwendet.

Vom Prinzip her handelt es sich hier um eine einfache Form von MPC (Model Predictive Control) mit SISO (single input, single output). Es wird jedoch nur ein Zeitschritt berechnet. Dabei entspricht der Zeitschritt der Regelung nicht dem Horizont der Modellrechnung, was das Risiko einer starken Überschwingung beinhaltet. Störgrößen können die Regelung stark beeinträchtigen. So ist nach der Branddetektion eine Wartezeit erforderlich, um Störungen durch den Verkehr auszuschliessen. Da diese Methode bereits in einigen Schweizer Tunneln verwendet wird, sollte diese Methode mit den anderen Regelungen verglichen werden.

2008, J. Porizek, J. Zaparka: “Ventilation control of the blanka tunnel: A Mathematical programming approach” [8]

Der 5700 m lange Blanka Tunnel (Prag, Tschechien) hat zwei richtungsgetrennte Röhren mit mehreren Ein- und Ausfahrten. Mit Hilfe von MPC („Model-based Predictive Control“) werden der Energieverbrauch und damit die Kosten im Normalbetrieb minimiert.

Hier wird MPC für den Normalbetrieb verwendet, um mit Hilfe einer Kostenfunktion den Energieverbrauch zu minimieren. Das Prinzip MPC soll in dieser Arbeit für den Brandbetrieb untersucht werden (siehe Kapitel 7.6.12).

2009, H. Nomura, M. Kobayashi: “Model-based predictive ventilation control in practical use and its evaluation” [11]

An einem Richtungsverkehrstunnel in Japan, mit einer Länge von 2368 wird am Ende des Tunnels die verschmutzte Luft über einen Axialventilator abgesaugt. Mit Hilfe einer neuen Regelungsmethode MPVC („Model-based Predictive Ventilation Control“) soll die Lüftung im Normalbetrieb geregelt werden. Die Resultate der Regelung mit MPVC werden verglichen mit einer Regelung mit Fuzzy Control. Es wird gezeigt, dass die Methode mit MPVC im Vergleich zu Fuzzy Control wirksamer funktioniert, die Energiekosten gesenkt werden können und dass bei MPVC keine mühsame Anpassung der Regelparameter notwendig ist. Die Arbeit nimmt Bezug auf die Paper [9] und [10], wo beschrieben ist, wie die Regelungsmethode entwickelt und getestet wurde.

Auch hier wird die Methode MPC für den Normalbetrieb verwendet, um die Energiekos-

ten zu senken. Verkehrsmessungen, Luftqualitätsmessungen und Strömungsmessungen sollen in die Regelung einfließen. Die Regelung selbst wird nicht detailliert erläutert.

Das Prinzip MPC soll in dieser Arbeit für den Brandbetrieb untersucht werden (siehe Kapitel 7.6.12).

2010, HBI Haerter AG: "Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall", Forschungsauftrag Bundesamt für Strassen (ASTRA) [12]

In dieser Arbeit wird in einem Kapitel die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit angesprochen. Es wird die stufenlose Regelung mit der Steuerung mit Zuweisung von Schaltstufen verglichen. Weiter werden zwei mögliche Gütekriterien definiert, welche eine Regelung einhalten sollte:

- Der Soll-Zustand soll schnell erreicht werden  
Ein Sollwert der Luftströmungsgeschwindigkeit soll innerhalb einer Bandbreite von einer definierten Abweichung innerhalb einer vorgegebenen Zeit erreicht werden. Dabei sind keine zusätzlichen dynamischen Störungen zu berücksichtigen.
- Störungen sollen schnell ausgeregelt werden  
Als massgebliche Störung wird eine Kraft definiert, welche bei ausgeschalteter Regelung auf eine definierte Abweichung vom Sollwert führen würde. Die Längsströmung soll bei Auftreten einer solchen Störung innerhalb einer definierten Zeit wieder die Sollgeschwindigkeit erreichen. Dabei darf kein Überschwingen auftreten, d.h. die maximal zulässige Abweichung von der Sollgeschwindigkeit muss auf beiden Seiten innerhalb der Bandbreite bleiben.

## 2 Modellierung des Systems Tunnel mit Lüftungsanlage

Abb. 2.1 zeigt schematisch das Modell eines Tunnels mit Lüftungsanlage.

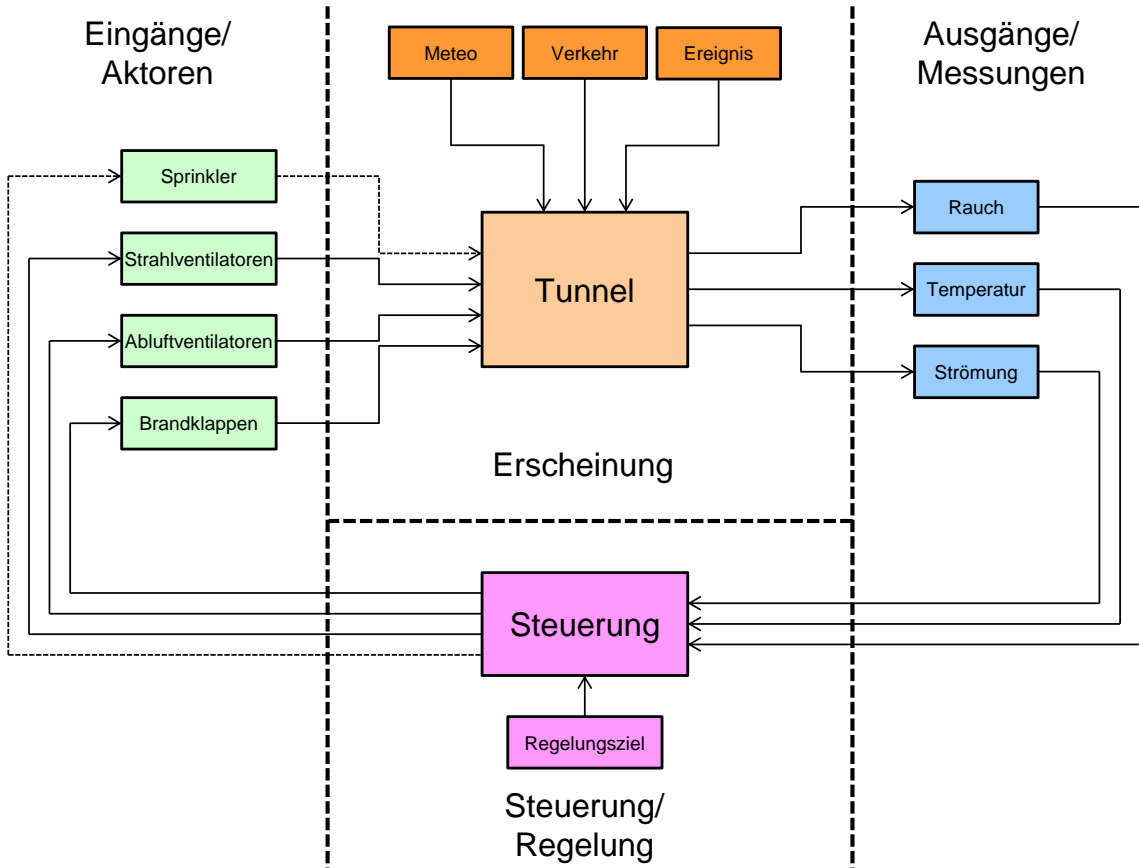


Abb. 2.1 Modell eines Tunnels mit Lüftungsanlage

Um die Luftströmung zu beeinflussen gibt es verschiedene Methoden (siehe z.B. [12]). In dieser Arbeit werden jedoch nur zwei Aktoren berücksichtigt:

- Die Strahlventilatoren
- Das Abluftsystem

Im Tunnel wird gewöhnlich an verschiedenen Punkten die Luftströmungsgeschwindigkeit sowie die Strömungsrichtung (Vorzeichen + oder -) gemessen. Die Wahl dieser Punkte ist nicht Teil dieses Forschungsprojekts und wird als vorgegeben angenommen.

Bei den Abluftventilatoren werden der Abluftvolumenstrom und gewöhnlich auch die Temperatur gemessen. Die Temperatur spielt für die Regelung jedoch keine Rolle.

Die Modellierung eines Tunnels mit Lüftungsanlage umfasst folgendes:

- Eingänge/Aktoren
  - Strahlventilatoren
  - Absaugung durch Klappen mit einem oder mehreren Abluftventilatoren
- Ausgänge/Messungen
  - Strömungsmessung im Tunnel
  - Volumenstrom der Abluftventilatoren

- Der Tunnel
  - Strömungswiderstände
  - Verkehr
  - Brand
  - Externe Einflüsse (z.B. Meteorologie, natürlicher Auftrieb)

Abb. 2.2 zeigt ein Schema eines Tunnels (z.B. Gotschnatunnel) mit verschiedenen Druckwirkungen.

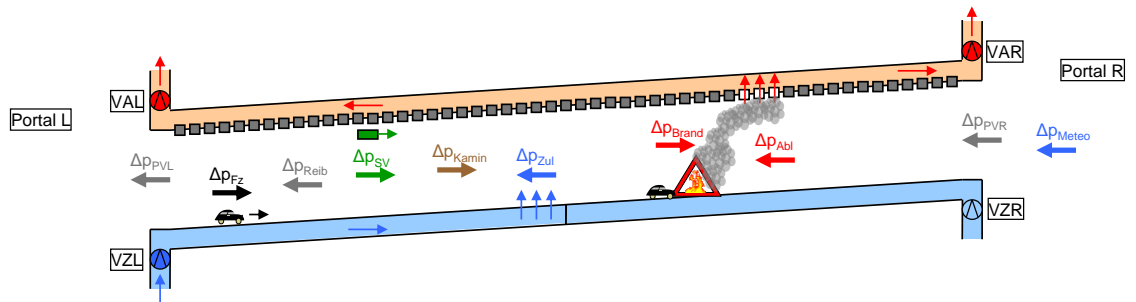


Abb. 2.2 Schema eines Tunnels mit verschiedenen Druckwirkungen

Die folgenden Drücke wirken in einem Tunnel:

- Druck infolge Impulsänderung ( $\Delta p_{\text{Imp}}$ )
- Reibungsverlust der Strömung ( $\Delta p_{\text{Reib}}$ )
- Ein- und Ausströmverluste an den Portalen ( $\Delta p_{\text{PVL}}$ ,  $\Delta p_{\text{PVR}}$ )
- Kolbeneffekt durch Fahrzeuge ( $\Delta p_{\text{Fz}}$ )
- Auf- und Abtrieb durch Temperaturunterschiede zwischen Tunnelwand und Umgebungsluft ( $\Delta p_{\text{Kamin}}$ )
- Kamineffekt durch Brand im Tunnel ( $\Delta p_{\text{Brand}}$ )
- Meteorologischer Druck (Winddruck, Barometrischer Druck etc.) am Portal ( $\Delta p_{\text{Meteo}}$ )
- Druckwirkung durch Strahlventilatoren ( $\Delta p_{\text{SV}}$ )
- Druckunterschiede aufgrund der Absaugung von Abluft ( $\Delta p_{\text{Abluft}}$ )
- Druckunterschiede aufgrund der Einblasung von Zuluft ( $\Delta p_{\text{Zuluft}}$ )

In dieser Arbeit wird die Modellierung der Zuluft nicht behandelt.

## 2.1 Beschreibung der untersuchten Systeme

Folgende zwei Systeme werden untersucht:

- System Längslüftung
- System Absaugung

### 2.1.1 Beschreibung des Systems Längslüftung

Das System Längslüftung ist die Kombination der Modelle Strahlventilator, Tunnel und Strömungsmessung.

Das System Längslüftung hat einen Eingang:

- Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV\_soll}$

Das System Längslüftung hat auch einen Ausgang:

- Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Tunnel

Für die Regelung muss die Strömungsmessung miteinbezogen werden.

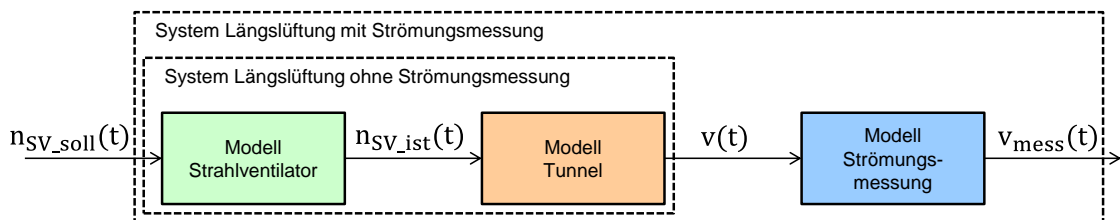


Abb. 2.3 Schema des Systems Längslüftung mit und ohne Strömungsmessung

### 2.1.2 Beschreibung des Systems Absaugung

Das System Absaugung ist die Kombination der Modelle Strahlventilator, Absaugung und Tunnel.

Das System Absaugung hat zwei Eingänge:

- Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV\_soll}$
- Absaugvolumenstrom  $Q_{Abs\_soll}$

Das System Absaugung hat auch zwei Ausgänge:

- Strömungsgeschwindigkeit  $v_L$  des linken Lüftungsabschnitts
- Strömungsgeschwindigkeit  $v_R$  des rechten Lüftungsabschnitts

Für die Regelung muss die Strömungsmessung miteinbezogen werden.

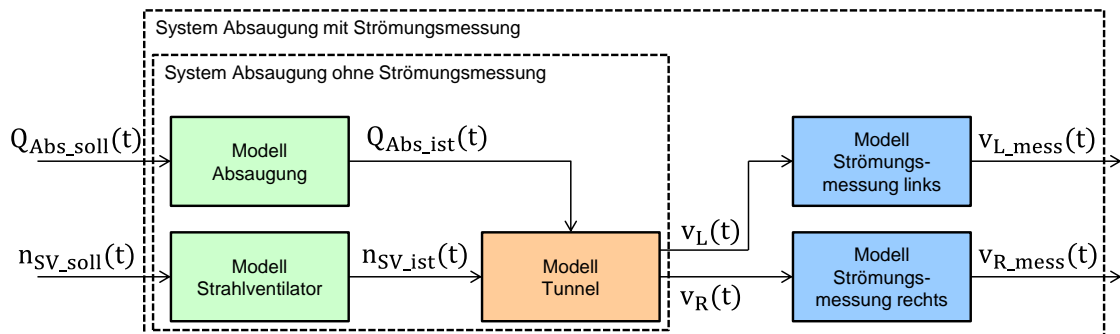


Abb. 2.4 Schema des Systems Absaugung mit und ohne Strömungsmessung

## 2.2 Modellierung der Strahlventilatoren

### 2.2.1 Dynamik der Strahlventilatoren

Ein Strahlventilator hat als Eingang einen gewissen Einschaltgrad  $act_{SV\_ist}$  ( $-1 < act_{SV\_ist} < 1$ ).

- $act_{SV\_ist} = 0$  → ausgeschaltet
- $act_{SV\_ist} = 1$  → voller Schub in positiver Richtung
- $act_{SV\_ist} = -1$  → voller Schub in negativer Richtung

Wird ein ausgeschalteter Strahlventilator eingeschaltet ( $act_{SV\_soll} = 1$ ), so muss das Lauf-  
rad zuerst beschleunigt werden. Die Druckwirkung des Strahlventilators hat somit eine  
Verzögerung gegenüber der Einschaltung. Der verzögerte Einschaltgrad des Strahlventi-  
lators wird dann als  $act_{SV\_ist}$  bezeichnet.

Für mehrere Strahlventilatoren werden entsprechend die Bezeichnungen  $n_{SV\_soll}$  und  
 $n_{SV\_ist}$  verwendet. Abb. 2.5 zeigt das Schema des Modells Strahlventilator.

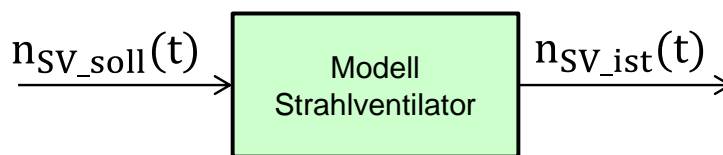


Abb. 2.5 Schema des Modells Strahlventilator

Diese Verzögerung der Strahlventilatoren wird mit 2 Modellen modelliert:

- Als Tiefpass 1. Ordnung (physikalisch genauer)
- Als Totzeit (mathematisch einfacher)

#### Modell Strahlventilator als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Die zeitliche Verzögerung der Strahlventilatoren wird als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) mo-  
delliert.

Abb. 2.6 zeigt das Modell eines Strahlventilators als Tiefpass 1. Ordnung (PT1).

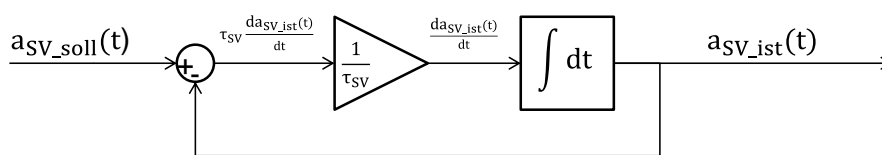


Abb. 2.6 Modell eines Strahlventilators als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Es gilt die Differentialgleichung:

$$\frac{dact_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (act_{SV\_soll} - act_{SV\_ist}) \quad 2-1$$

Mit:

$act_{SV}$	Einschaltgrad (Aktivierung) eines Strahlventilatoren	[-]
$t$	Zeit	[s]
$\tau_{SV}$	Zeitkonstante des Strahlventilators	[s]

Für  $n_{SV}$  Strahlventilatoren gilt:

$$n_{SV} \cdot \text{act}_{SV\_soll} = n_{SV\_soll} \quad 2-2$$

$$n_{SV} \cdot \text{act}_{SV\_ist} = n_{SV\_ist} \quad 2-3$$

Und somit ergibt sich:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 2-4$$

Abb. 2.7 zeigt das Modell der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung (PT1).

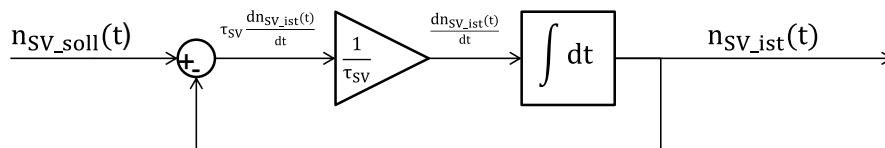


Abb. 2.7 Modell der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Mit Hilfe der Laplace-Transformation können Differentialgleichungen im Zeitbereich (mit der Variable  $t$ ) in den Frequenzbereich (mit der komplexen Variable  $s$ ) umgewandelt werden (siehe auch Anhang II).

Für die Gleichung der Strahlventilatoren im Frequenzbereich gilt:

$$s \cdot \tau_{SV} \cdot n_{SV\_ist}(s) = n_{SV\_soll}(s) - n_{SV\_ist}(s) \quad 2-5$$

Mit:

$$s \quad \text{Komplexe Frequenz} \quad [1/s]$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion  $G_{SV}(s)$ :

$$G_{SV\_PT1}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{1}{(s \cdot \tau_{SV} + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_{SV}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{SV}}\right)} \quad 2-6$$

Die Zeitkonstante  $\tau_{SV}$  eines realen Strahlventilators beträgt in der Regel einige Sekunden. Für die Modellierung wird folgende Zeitkonstante der Strahlventilatoren angenommen:

$$\tau_{SV} = 5 \text{ [s]} \quad 2-7$$

Abb. 2.8 zeigt die Sprungantwort eines einzelnen Strahlventilators mit einer Zeitkonstante von  $\tau_{SV} = 5 \text{ s}$ .

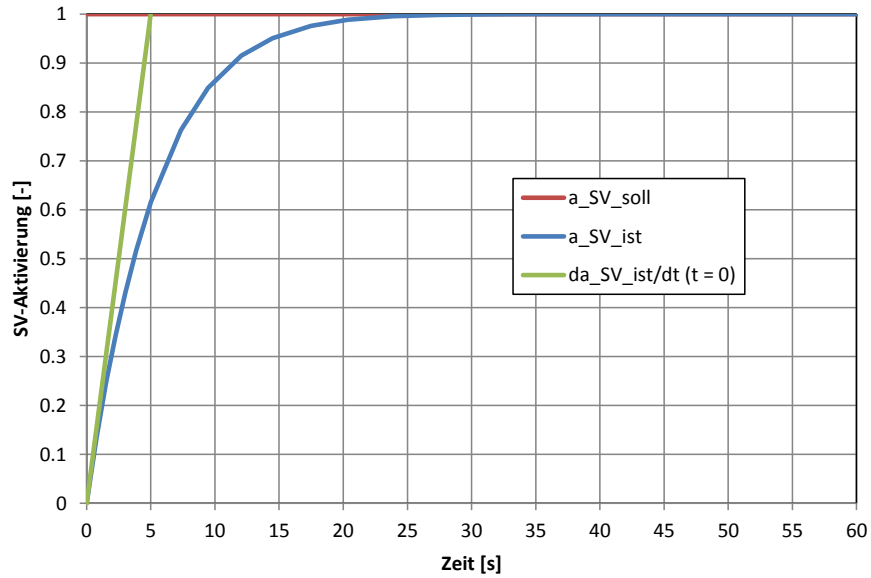


Abb. 2.8 Sprungantwort des Strahlventilators als Tiefpass 1. Ordnung (mit  $\tau_{SV} = 5s$ )

**Modell Strahlventilator als Totzeit (TZ)**

Die zeitliche Verzögerung der Strahlventilatoren wird als Totzeit modelliert.

Abb. 2.9 zeigt das Modell eines Strahlventilators als Totzeit (TZ).

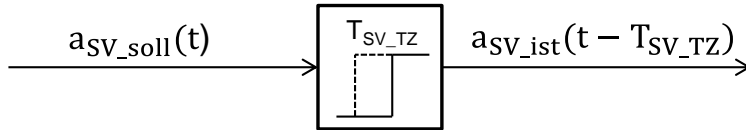


Abb. 2.9 Modell eines Strahlventilators als Totzeit (TZ)

Für einen Strahlventilator gilt:

$$act_{SV\_ist}(t) = act_{SV\_soll}(t - T_{SV\_TZ}) \tag{2-8}$$

Mit:

$$T_{SV\_TZ} \quad \text{Totzeit des Strahlventilators} \tag{[s]}$$

Für  $n_{SV}$  Strahlventilatoren gilt:

$$n_{SV} \cdot act_{SV\_soll} = n_{SV\_soll} \tag{2-9}$$

$$n_{SV} \cdot act_{SV\_ist} = n_{SV\_ist} \tag{2-10}$$

Und somit ergibt sich:

$$n_{SV\_ist}(t) = n_{SV\_soll}(t - T_{SV\_TZ}) \tag{2-11}$$

Abb. 2.10 zeigt das Modell der Strahlventilatoren als Totzeit (TZ).

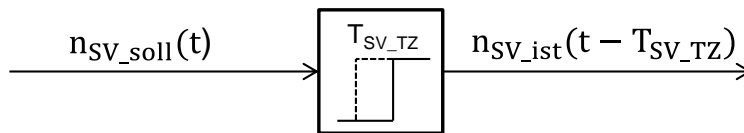


Abb. 2.10 Modell der Strahlventilatoren als Totzeit (TZ)

Für die Modellierung wird die Totzeit der Strahlventilatoren näherungsweise der Zeitkonstante der Strahlventilatoren gleichgesetzt:

$$T_{SV\_TZ} = \tau_{SV} = 5 \text{ [s]} \quad 2-12$$

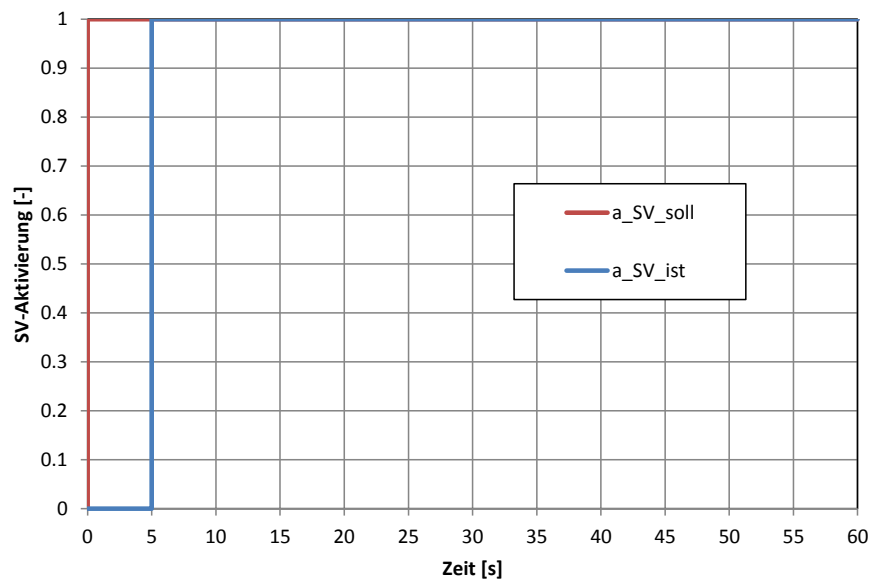
Für die Gleichung der Strahlventilatoren im Frequenzbereich gilt:

$$n_{SV\_ist}(s) = n_{SV\_soll}(s) \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 2-13$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion  $G_{SV\_TZ}(s)$ :

$$G_{SV\_TZ}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 2-14$$

Abb. 2.11 zeigt die Sprungantwort eines einzelnen Strahlventilators mit einer Totzeit von  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ .

Abb. 2.11 Sprungantwort des Strahlventilators als Totzeit (mit  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ )

## 2.2.2 Modellierung der zeitlichen Verzögerung beim Einschalten mehrerer Strahlventilatoren

Wenn Strahlventilatoren ohne Starthilfen direkt angetrieben werden, erfolgen die Schaltungen mehrerer Ventilatoren üblicherweise mit einer Verzögerungszeit bzw. Schaltzeit  $T_{SV\_SZ}$  von einigen Sekunden, um Stromspitzen der Anlage zu vermeiden. Für eine kleine Anzahl Strahlventilatoren kann die Schaltzeit vernachlässigt werden. Bei mehreren Strahlventilatoren muss die Schaltzeit jedoch ins Modell miteinbezogen werden.

Für die Modellierung wird folgende Schaltzeit der Strahlventilatoren  $T_{SV\_SZ}$  angenommen:

$$T_{SV\_SZ} = 5 \text{ [s]} \quad 2-15$$

Das Einschalten mehrerer Ventilatoren kann als Rampe modelliert werden, mit der maximalen Einschalttrate  $m_{SV\_max}$ :

$$m_{SV\_max} = \frac{1}{T_{SV\_SZ}} = 0.2 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right] \quad 2-16$$

Mit:

$m_{SV\_max}$	Maximale Einschalttrate der Strahlventilatoren	[1/s]
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit der Strahlventilatoren	[s]

Für die Zeitdauer der Rampe  $T_{SV\_R}$  ergibt sich:

$$T_{SV\_R} = n_{SV} \cdot T_{SV\_SZ} \quad 2-17$$

Mit:

$T_{SV\_R}$	Zeitdauer der Rampe	[s]
-------------	---------------------	-----

Im Beispieeltunnel Gotschna sind 24 Strahlventilatoren installiert. Um alle Strahlventilatoren gleichzeitig einzuschalten dauert es somit 120 s.

Abb. 2.12 zeigt die zeitliche Verzögerung (reale Steuerung und Modell) beim sprunghaften Einschalten von 24 Strahlventilatoren.

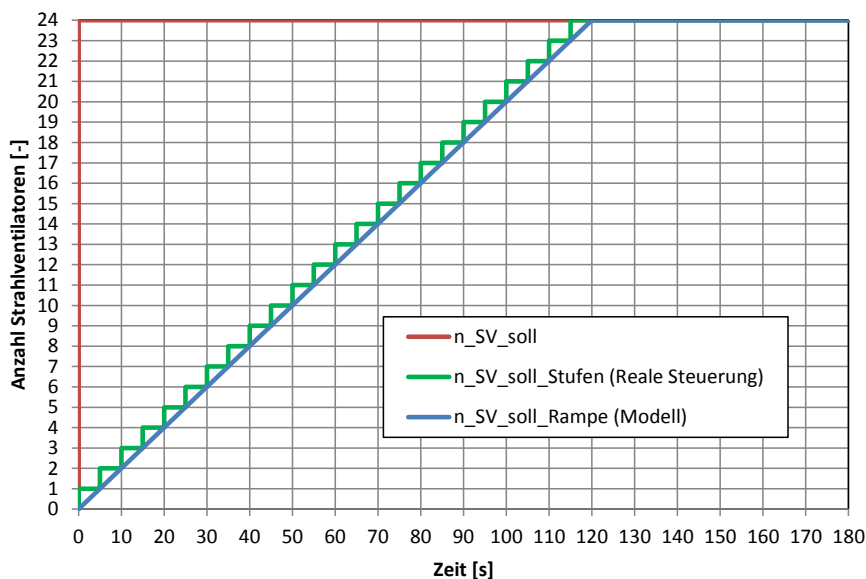


Abb. 2.12 Zeitliche Verzögerung beim sprunghaften Einschalten von 24 SV (reale Steuerung und Modell)

Für die SV-Rampe gilt im Zeitbereich:

$$n_{SV\_soll\_R} = \begin{cases} m_{SV\_max} \cdot t, & t < T_{SV\_R} \\ n_{SV\_soll}, & t \geq T_{SV\_R} \end{cases} \quad 2-18$$

Im Frequenzbereich gilt entsprechend:

$$n_{SV\_soll\_R}(s) = \frac{m_{SV\_max}}{s^2} \cdot (1 - e^{-T_{SV\_R} \cdot s}) \quad 2-19$$

Im numerischen Modell (RTV oder MATLAB) kann die zeitliche Verzögerung beim Einschalten mehrerer Strahlventilatoren mit einer maximalen Steigungsrate modelliert werden.

### 2.2.3 Druckwirkung der Strahlventilatoren im Tunnel

Die Druckwirkung der Strahlventilatoren ist ein Teilmodell des Modells Tunnel. Der Strahlventilator bewirkt im Tunnel einen Schub oder besser gesagt einen Druckunterschied. Bei  $n_{SV}$  Strahlventilatoren multipliziert sich der Druck entsprechend.

Vom Hersteller der Strahlventilatoren wird normalerweise der Standschub angegeben. Mit dem Standschub kann die Ausblasgeschwindigkeit  $v_{SV}$  definiert werden.

Für den Standschub  $\Delta F_{1SV\_stand}$  (ohne Einbaufaktoren) gilt:

$$\Delta F_{1SV\_stand} = \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2 \quad 2-20$$

Mit:

$\Delta F_{1SV\_stand}$	Standschub eines Strahlventilators	[N]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]

Für die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren  $v_{SV}$  ergibt sich somit:

$$v_{SV} = \sqrt{\frac{\Delta F_{1SV\_stand}}{\rho \cdot A_{SV}}} \quad 2-21$$

Diese Ausblasgeschwindigkeit entspricht in der Regel nicht den Datenblättern der Hersteller, da diese gewöhnlich noch einen aerodynamischen Wirkungsgrad von 0.9 oder 0.95 einbeziehen.

Der Schub von  $n_{SV}$  Strahlventilatoren  $\Delta F_{SV}$  im Tunnel ist definiert als:

$$\Delta F_{SV} = \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v(t)) \cdot v_{SV}}{k_{SV}} \quad 2-22$$

Mit:

$\Delta F_{SV}$	Der Schub von $n_{SV}$ Strahlventilatoren	[N]
$n_{SV\_ist}$	Anzahl laufende Strahlventilatoren	[-]
$v(t)$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]

Für die Druckerzeugung  $\Delta p_{SV}$  durch  $n_{SV}$  Strahlventilatoren ergibt sich:

$$\Delta p_{SV} = \frac{\Delta F_{SV}}{A_T} = \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v(t)) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T} \quad 2-23$$

Mit:

$\Delta p_{SV}$  Druckerzeugung von  $n_{SV}$  Strahlventilatoren [Pa]  
 $A_T$  Querschnittsfläche des Tunnels [m<sup>2</sup>]

Abb. 2.13 zeigt das Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren im Tunnel. Das Modell ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel.

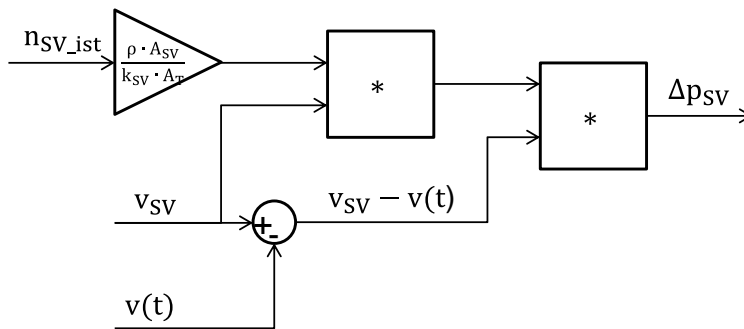


Abb. 2.13 Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren im Tunnel

Das Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren im Tunnel kann mit einer Näherung weiter vereinfacht werden.

Die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren  $v_{SV}$  ist in der Regel um ein vielfaches grösser als die Strömungsgeschwindigkeit  $v_T$  im Tunnel:

$$v_{SV} \gg v_T \quad 2-24$$

Somit kann folgendes angenommen werden:

$$v_{SV} - v_T \approx v_{SV} \quad 2-25$$

Daraus ergibt sich vereinfacht:

$$\Delta p_{SV} = \frac{\Delta F_{SV}}{A_T} \approx \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T} \quad 2-26$$

Abb. 2.14 zeigt das vereinfachte Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren im Tunnel. Das vereinfachte Modell hat den Vorteil, dass es nicht von der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel abhängig ist. Die weiteren Berechnungen und die Systemanalyse werden vereinfacht.

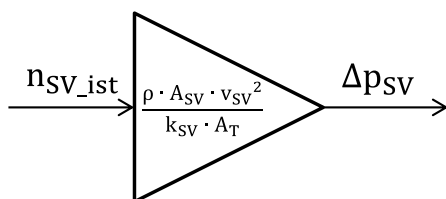


Abb. 2.14 Vereinfachtes Modell der Druckerzeugung durch SV im Tunnel

## 2.3 Modellierung des Abluftsystems

Analog zum Modell des Strahlventilators, hat auch ein Axialventilator als Eingang einen gewissen Einschaltgrad  $\text{act}_{\text{AV\_ist}}$  ( $-1 < \text{act}_{\text{AV\_ist}} < 1$ ).

$\text{act}_{\text{AV\_ist}} = 0$  → ausgeschaltet  
 $\text{act}_{\text{AV\_ist}} = 1$  → volle Drehzahl in positiver Richtung  
 $\text{act}_{\text{AV\_ist}} = -1$  → volle Drehzahl in negativer Richtung

Wird ein ausgeschalteter Axialventilator eingeschaltet ( $\text{act}_{\text{AV\_soll}} = 1$ ), so muss das Lauf-  
 rad zuerst beschleunigt werden. Die Druckwirkung des Axialventilators hat somit eine  
 Verzögerung gegenüber der Einschaltung. Der verzögerte Einschaltgrad des Axialventila-  
 tors wird dann als  $\text{act}_{\text{AV\_ist}}$  bezeichnet.

Für den Volumenstrom wird entsprechend die Bezeichnung  $Q_{\text{AV\_soll}}$  und  $Q_{\text{AV\_ist}}$  verwendet.  
 Abb. 2.15 zeigt das Schema des Modells Axialventilator.

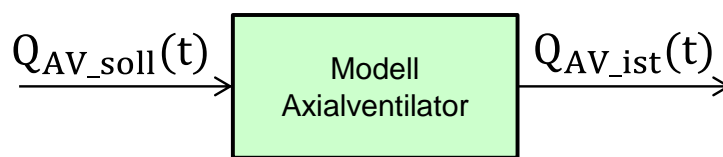


Abb. 2.15 Schema des Modells Axialventilator

Die zeitliche Verzögerung des Axialventilators wird als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) model-  
 liert.

Abb. 2.16 zeigt das Modell eines Axialventilators als Tiefpass 1. Ordnung (PT1).

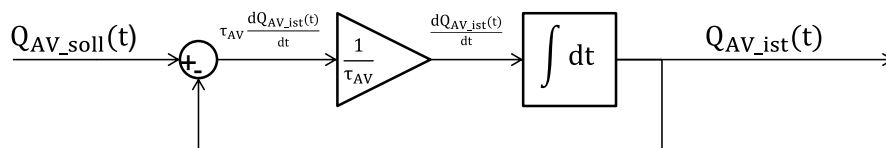


Abb. 2.16 Modell eines Axialventilators als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Es gilt die Differentialgleichung:

$$\frac{dQ_{\text{AV\_ist}}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{AV}}} \cdot (Q_{\text{AV\_soll}} - Q_{\text{AV\_ist}}) \quad 2-27$$

Mit:

$Q_{\text{AV}}$	Volumenstrom des Abluftventilators	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$\tau_{\text{AV}}$	Zeitkonstante des Axialventilators	$[\text{s}]$

Für die Gleichung des Axialventilators im Frequenzbereich gilt:

$$s \cdot \tau_{\text{AV}} \cdot Q_{\text{AV\_ist}}(s) = Q_{\text{AV\_soll}}(s) - Q_{\text{AV\_ist}}(s) \quad 2-28$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion  $G_{\text{AV}}(s)$ :

$$G_{\text{AV\_PT1}}(s) = \frac{Q_{\text{AV\_ist}}(s)}{Q_{\text{AV\_soll}}(s)} = \frac{1}{(s \cdot \tau_{\text{AV}} + 1)} = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_{\text{AV}}}} \quad 2-29$$

Die Zeitkonstante eines realen Axialventilators beträgt in der Regel einige Sekunden. Für die Modellierung wird folgende Zeitkonstante angenommen:

$$\tau_{AV} = 10 \text{ [s]}$$

2-30

Abb. 2.17 zeigt die Sprungantwort eines Axialventilators mit einer Zeitkonstante von  $\tau_{AV} = 10 \text{ s}$ . Die volle Absaugmenge wird nach ca. 50 s erreicht.

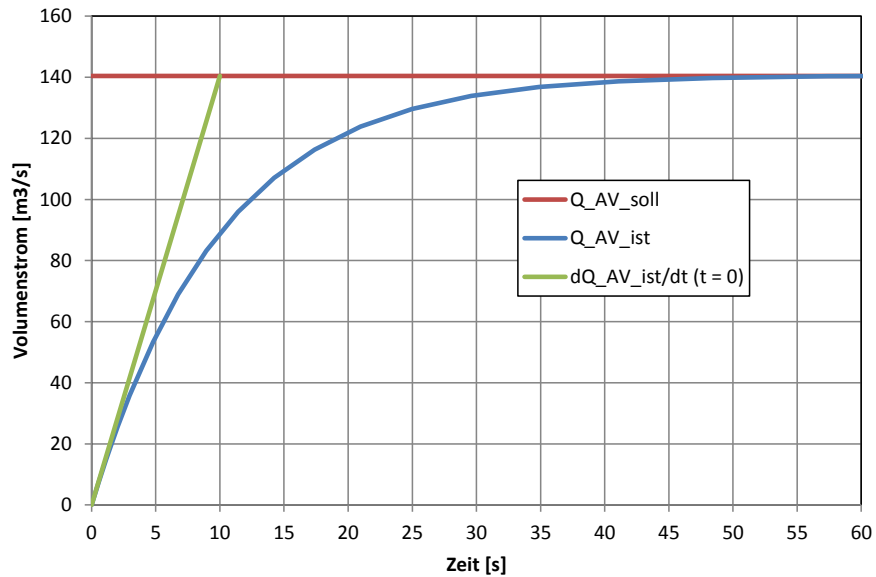


Abb. 2.17 Sprungantwort des Axialventilators als Tiefpass 1. Ordnung (mit  $\tau_{AV} = 10\text{s}$ )

## 2.4 Modellierung der Strömungsmessung

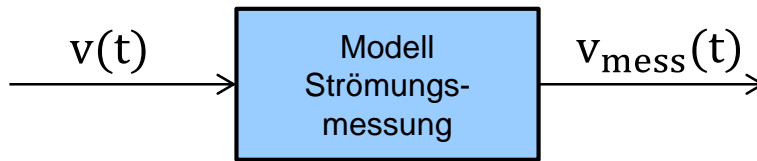


Abb. 2.18 Schema des Modells Strömungsmessung

### Modell Strömungsmessung als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Bei realen Strömungsmessungen wird das Messsignal gefiltert um kleine Schwankungen zu glätten. Für die Filterung wird eine kleine Verzögerung (PT1-Glied) mit der Zeitkonstante  $\tau_{\text{mess}}$  hinzugefügt (siehe Abb. 2.19).

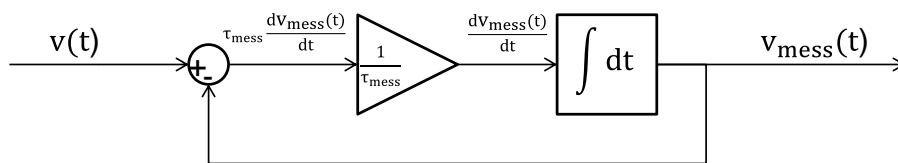


Abb. 2.19 Modell der Strömungsmessung

Es gilt:

$$\frac{dv_{\text{mess}}}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \cdot (v - v_{\text{mess}}) \quad 2-31$$

Mit:

$v_{\text{mess}}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$v(t)$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$\tau_M$	Zeitkonstante der Messfilterung	[s]

Im Brandfall wird in der Regel eine Zeitkonstante von  $\tau_M = 10$  s angenommen.

Für die Übertragungsfunktion gilt dann:

$$G_{\text{mess\_PT1}}(s) = \frac{v_{\text{mess}}(s)}{v(s)} = \frac{1}{(s \cdot \tau_M + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_M}}{\left(s + \frac{1}{\tau_M}\right)} \quad 2-32$$

Bei der Regelung muss die zeitliche Verzögerung der Messung ins Modell miteinbezogen werden.

### Modell Strömungsmessung als Totzeit (TZ)

Um die zeitliche Verzögerung der Messung vereinfacht zu modellieren (z.B. für die Regelung), kann die Messung wiederum als Totzeit modelliert werden.

Abb. 2.20 zeigt das Modell der Strömungsmessung als Totzeit (TZ).

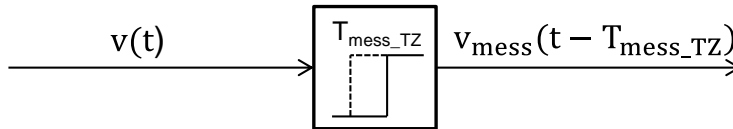


Abb. 2.20 Modell der Strömungsmessung als Totzeit (TZ)

Dann gilt:

$$v_{\text{mess}}(t) = v(t - T_{\text{mess\_TZ}}) \quad 2-33$$

Mit:

$v_{\text{mess}}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$v(t)$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$T_{\text{mess\_TZ}}$	Totzeit der Messung	[s]

Für die Modellierung wird die Totzeit der Messung  $T_{\text{mess\_TZ}}$  näherungsweise der Zeitkonstante der Messung  $\tau_M$  gleichgesetzt:

$$T_{\text{mess\_TZ}} = \tau_M = 10 \text{ [s]} \quad 2-34$$

Für die Gleichung der Messung als Totzeit im Frequenzbereich gilt:

$$v_{\text{mess}}(s) = v(s) \cdot e^{-T_{\text{mess\_TZ}} \cdot s} \quad 2-35$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion der Messung als Totzeit  $G_{\text{mess\_TZ}}(s)$ :

$$G_{\text{mess\_TZ}}(s) = \frac{v_{\text{mess}}(s)}{v(s)} = e^{-T_{\text{mess\_TZ}} \cdot s} \quad 2-36$$

### Modell ideale Strömungsmessung

Bei einem idealen Modell ohne Messstörungen kann vereinfacht angenommen werden:

$$v_{\text{mess}}(t) \approx v(t) \quad 2-37$$

Im Frequenzbereich:

$$v_{\text{mess}}(s) \approx v(s) \quad 2-38$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion  $G_{\text{mess}}(s)$ :

$$G_{\text{mess}}(s) = \frac{v_{\text{mess}}(s)}{v(s)} \approx 1 \quad 2-39$$

## 2.5 Modellierung eines Tunnels ohne Absaugung

### 2.5.1 Herleitung der Differentialgleichung eines Tunnels ohne Absaugung

Abb. 2.21 zeigt ein Schema eines Tunnels mit verschiedenen Druckwirkungen ohne Absaugung.

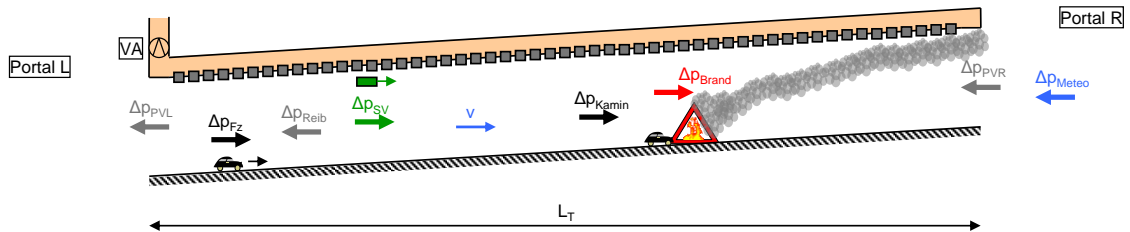


Abb. 2.21 Schema eines Tunnels mit verschiedenen Druckwirkungen ohne Absaugetrieb

Für die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  gilt:  
 Richtung der Strömungsgeschwindigkeit  $L \rightarrow R$ :  $v > 0$   
 Richtung der Strömungsgeschwindigkeit  $L \leftarrow R$ :  $v < 0$

Die Drucktermen werden wie folgt modelliert:

#### Druck infolge Impulsänderung ( $\Delta p_{\text{Imp}}$ )

Für eine Luftsäule der Länge  $L$  gilt:

$$\Delta p_{\text{Imp}} = \frac{dv}{dt} \cdot \rho \cdot L = \frac{d\dot{m}}{dt} \cdot \frac{L}{A_T} \quad 2-40$$

Mit:

$\Delta p_{\text{Imp}}$	Druck infolge Impulsänderung	[Pa]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$m$	Masse der Luft	[kg]

Mit:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_T \cdot v \quad 2-41$$

#### Reibungsverlust der Strömung ( $\Delta p_{\text{Reib}}$ )

Der Reibungsverlust in einem Tunnelabschnitt der Länge  $L$  wirkt verteilt über die Länge:

$$\Delta p_{\text{Reib}} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}} \right) \quad 2-42$$

Mit:

$\Delta p_{\text{Reib}}$	Druck infolge Reibungsverlust	[Pa]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$D_{\text{hyd}}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]

**Ein- und Ausströmverluste an den Portalen ( $\Delta p_{PVL}$ ,  $\Delta p_{PVR}$ )**

Die Ein- und Ausströmverluste wirken lokal an den Portalen.

PL = Linkes Portal  
PR = Rechtes Portal

$$\Delta p_{PVL} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \kappa_{PL} \quad 2-43$$

$$\Delta p_{PVR} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \kappa_{PR} \quad 2-44$$

Mit:

$\Delta p_{PV}$	Druckverlust an Portal	[Pa]
$\kappa_P$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals	[-]

Wobei:

$$\kappa_{PL} = \begin{cases} 1 & \text{bei } v < 0 \text{ (Ausströmen)} \\ 0.6 & \text{bei } v \geq 0 \text{ (Einströmen)} \end{cases} \quad 2-45$$

$$\kappa_{PR} = \begin{cases} 1 & \text{bei } v \geq 0 \text{ (Ausströmen)} \\ 0.6 & \text{bei } v < 0 \text{ (Einströmen)} \end{cases} \quad 2-46$$

**Kolbeneffekt durch Fahrzeuge ( $\Delta p_{Fz}$ )**

Jedes Fahrzeug (Fz) im Tunnel bewirkt einen Kolbeneffekt.

Für eine bestimmte Anzahl Fahrzeuge  $n_{Fz}$  in einem Tunnel gilt:

$$\Delta p_{Fz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{Fz} \cdot c_{w_{Fz}} A_{Fz}}{A_T} \cdot (v_{Fz} - v) \cdot |v_{Fz} - v| \quad 2-47$$

Mit:

$\Delta p_{Fz}$	Kolbeneffekt durch Fahrzeuge	[Pa]
$n_{Fz}$	Anzahl Fahrzeuge	[-]
$c_{w_{Fz}}$	Widerstandskoeffizient der Fahrzeuge	[-]
$A_{Fz}$	Querschnittsfläche der Fahrzeuge	[m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$v_{Fz}$	Geschwindigkeit der Fahrzeuge	[m/s]

Spezialfall: Stillstand der Fahrzeuge

Im Brandfall kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge still stehen.

Es gilt somit:

$$v_{Fz} = 0$$

Für den Kolbeneffekt der Fahrzeuge gilt somit:

$$\Delta p_{Fz0} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{Fz} \cdot c_{w_{Fz}} A_{Fz}}{A_T} \cdot v \cdot |v| \quad 2-48$$

Für 2 verschiedene Fahrzeugtypen, z.B. Personenwagen (PW) und Lastwagen (LW) gilt:

$$\Delta p_{Fz0} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{(n_{PW} \cdot c_{WPW} A_{PW} + n_{LW} \cdot c_{WLW} A_{LW})}{A_T} \cdot v \cdot |v| \quad 2-49$$

Mit:

$n_{PW}$	Anzahl Personenkraftwagen	[-]
$c_{WPW}$	Widerstandskoeffizient der Personenkraftwagen	[-]
$A_{PW}$	Querschnittsfläche der Personenkraftwagen	[m <sup>2</sup> ]
$n_{LW}$	Anzahl Lastkraftwagen	[-]
$c_{WLW}$	Widerstandskoeffizient der Lastkraftwagen	[-]
$A_{LW}$	Querschnittsfläche der Lastkraftwagen	[m <sup>2</sup> ]

Die Anzahl Personenwagen  $n_{PW}$  und die Anzahl Lastwagen  $n_{LW}$  können durch den Lastwagen-Anteil  $a_{LW}$  ausgedrückt werden.

$$n_{PW} = n_{Fz} \cdot (1 - a_{LW}) \quad 2-50$$

$$n_{LW} = n_{Fz} \cdot a_{LW} \quad 2-51$$

Mit:

$a_{LW}$	Lastwagenanteil	[-]
----------	-----------------	-----

Für den Kolbeneffekt der zwei Fahrzeugtypen gilt somit:

$$\Delta p_{Fz0} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{(n_{Fz} \cdot (1 - a_{LW}) \cdot c_{WPW} A_{PW} + n_{Fz} \cdot a_{LW} \cdot c_{WLW} A_{LW})}{A_T} \cdot v \cdot |v| \quad 2-52$$

Umgeformt:

$$\Delta p_{Fz0} = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{Fz}}{A_T} \cdot \frac{[(1 - a_{LW}) \cdot c_{WPW} A_{PW} + a_{LW} \cdot c_{WLW} A_{LW}]}{c_{WFz} A_{Fz}} \cdot v \cdot |v| \quad 2-53$$

Spezialfall: Maximale Anzahl Fahrzeuge im Tunnel

Die maximale Kapazität in einem Tunnel wird normalerweise durch die maximale PWE-Dichte (Personenwageneinheitsdichte) im Tunnel definiert.

Gemäss der Schweizer Richtlinie [1] gilt für stehenden Verkehr:

$$d_{PWE\_max} = 150 [1/km] = 0.15 [1/m] \quad 2-54$$

$$PWE_{PW} = 1 \quad 2-55$$

$$PWE_{LW} = 2 \quad 2-56$$

Mit:

$d_{PWE\_max}$	Maximale Personenwageneinheitsdichte pro Spur	[1/m]
$PWE_{PW}$	Personenwageneinheiten für Personenkraftwagen	[-]
$PWE_{LW}$	Personenwageneinheiten für Lastkraftwagen	[-]

Für die maximale Anzahl Personenwageneinheiten im Tunnel gilt:

$$n_{PWE\_max} = d_{PWE\_max} \cdot L \cdot n_{Spur} \quad 2-57$$

Mit:

$n_{PWE\_max}$	Maximale Anzahl Personenwageneinheiten im Tunnel	[-]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$n_{Spur}$	Anzahl Fahrspuren	[-]

Die maximale Anzahl Personenwageneinheiten im Tunnel kann auch durch die Anzahl Fahrzeuge ausgedrückt werden.

$$n_{PWE\_max} = n_{PW\_max} + n_{LW\_max} \cdot PWE_{LW} \quad 2-58$$

Mit dem Lastwagenanteil ergibt sich wiederum:

$$n_{PWE\_max} = n_{Fz\_max} \cdot (1 - a_{LW}) + n_{Fz\_max} \cdot a_{LW} \cdot PWE_{LW} \quad 2-59$$

Und somit:

$$n_{PWE\_max} = n_{Fz\_max} \cdot [1 + a_{LW} \cdot (PWE_{LW} - 1)] \quad 2-60$$

Für die maximale Anzahl Fahrzeuge im Tunnel ergibt sich entsprechend:

$$n_{Fz\_max} = \frac{n_{PWE\_max}}{[1 + a_{LW} \cdot (PWE_{LW} - 1)]} = \frac{d_{PWE\_max} \cdot L \cdot n_{Spur}}{[1 + a_{LW} \cdot (PWE_{LW} - 1)]} \quad 2-61$$

Für den Kolbeneffekt bei Stillstand (mit der maximalen Anzahl Fahrzeuge im Tunnel) ergibt sich somit:

$$\Delta p_{Fz0} = -\frac{\rho}{2} \cdot \frac{d_{PWE\_max} \cdot L \cdot n_{Spur}}{n_{Fz\_max} \cdot [1 + a_{LW} \cdot (PWE_{LW} - 1)]} \cdot \frac{[(1 - a_{LW})c_{WPW}A_{PW} + a_{LW}c_{WLW}A_{LW}]}{A_T} \cdot v \cdot |v| \quad 2-62$$

### Auf- und Abtrieb durch Temperaturunterschiede zwischen Tunnelluft und Umgebungsluft ( $\Delta p_{Kamin}$ )

Über einen Tunnel der Länge  $L$  und einer mittleren Steigung  $st$  ergibt sich bei einem Temperaturunterschied zwischen Tunnel- und Umgebungsluft einen Kamineffekt.

$$\Delta p_{Kamin} = st \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \left( \frac{T_T - T_0}{T_0} \right) \quad 2-63$$

Mit:

$\Delta p_{Kamin}$	Auf- und Abtrieb durch Temperaturunterschiede	[Pa]
$st$	Steigung im Tunnel	[-]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$T_T$	Temperatur im Tunnel	[K]
$T_0$	Temperatur der Umgebungsluft	[K]

**Kamineffekt durch Brand im Tunnel ( $\Delta p_{\text{Brand}}$ )**

Der Brand kann vereinfacht als ein Abschnitt mit der Länge  $L_{\text{Brand}}$  und einer konstanten Temperatur  $T_{\text{Brand}}$  modelliert werden. Mit der durchschnittlichen Steigung  $st_{\text{Brand}}$  des Brandabschnitts gilt dann:

$$\Delta p_{\text{Brand}} = st_{\text{Brand}} \cdot L_{\text{Brand}} \cdot \rho \cdot g \cdot \left( \frac{T_{\text{Brand}} - T_0}{T_0} \right) \quad 2-64$$

Mit:

$\Delta p_{\text{Brand}}$	Auftrieb durch Brand	[Pa]
$st_{\text{Brand}}$	Steigung des Brandabschnitts	[-]
$L_{\text{Brand}}$	Länge des Brandabschnitts	[m]
$T_{\text{Brand}}$	Temperatur des Brandes	[K]
$T_0$	Temperatur der Umgebungsluft	[K]

**Druckwirkung durch Strahlventilatoren ( $\Delta p_{\text{SV}}$ )**

Die Druckwirkung der Strahlventilatoren wurden in Kapitel 2.2.3 modelliert. Es gilt:

$$\Delta p_{\text{SV}} = \frac{\Delta F_{\text{SV}}}{A_T} = \frac{n_{\text{SV\_ist}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot (v_{\text{SV}} - v(t)) \cdot v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} \cdot A_T} \quad 2-65$$

Mit:

$\Delta p_{\text{SV}}$	Druckerzeugung von $n_{\text{SV}}$ Strahlventilatoren	[Pa]
$\Delta F_{\text{SV}}$	Der Schub von $n_{\text{SV}}$ Strahlventilatoren	[N]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$n_{\text{SV\_ist}}$	Anzahl laufende Strahlventilatoren	[-]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$A_{\text{SV}}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{\text{SV}}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$v(t)$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$k_{\text{SV}}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]

Für das vereinfachte Modell (unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit) gilt:

$$\Delta p_{\text{SV}} \approx \frac{n_{\text{SV\_ist}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot v_{\text{SV}}^2}{k_{\text{SV}} \cdot A_T} \quad 2-66$$

**Meteorologischer Druck (Winddruck, Barometrischer Druck etc.) am Portal ( $\Delta p_{\text{Meteo}}$ )**

Bei Tunneln, welche grössere Bergketten durchstossen, können grosse barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen auftreten. Bei Wind wirkt zusätzlich ein Winddruck auf das Portal. Diese Meteorologischen Drücke können Zusammengefasst werden als meteorologischer Druck  $\Delta p_{\text{Meteo}}$ , welcher sich auf das Portal auswirkt.

$$\Delta p_{\text{Meteo}} = -p_{\text{Meteo}} \quad 2-67$$

Mit:

$\Delta p_{\text{Meteo}}$	Druckerzeugung durch meteorologischer Druck	[Pa]
$p_{\text{Meteo}}$	Druckerzeugung auf das Portal	[Pa]

### Summe aller Drücke

Bei konstantem Tunnelquerschnitt gilt: Die Summe aller Drücke in einem Tunnel ist gleich null.

$$0 = \sum \Delta p \quad 2-68$$

$$= -\Delta p_{\text{Imp}} + \Delta p_{\text{Reib}} + \Delta p_{\text{PVL}} + \Delta p_{\text{PVR}} + \Delta p_{\text{Fz}} + \Delta p_{\text{Kamin}} + \Delta p_{\text{Brand}} + \Delta p_{\text{Meteo}} + \Delta p_{\text{SV}}$$

Es ergibt sich somit:

$$\underbrace{\frac{dv}{dt} \cdot L \cdot \rho}_{\Delta p_{\text{Imp}}} = \underbrace{\left(-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \left(\frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}}\right)\right)}_{\Delta p_{\text{Reib}}} + \underbrace{\left(-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \kappa_{\text{PL}}\right)}_{\Delta p_{\text{PVL}}} + \underbrace{\left(-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \kappa_{\text{PR}}\right)}_{\Delta p_{\text{PVR}}} \quad 2-69$$

$$+ \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{\text{Fz}} \cdot c_w \cdot A_{\text{Fz}}}{A_{\text{T}}} \cdot (v_{\text{Fz}} - v) \cdot |v_{\text{Fz}} - v|}_{\Delta p_{\text{Fz}}} + \underbrace{\frac{n_{\text{SV,ist}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot (v_{\text{SV}} - v) \cdot v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} \cdot A_{\text{T}}}}_{\Delta p_{\text{SV}}}$$

$$+ \underbrace{st_{\text{T}} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\frac{T_{\text{T}} - T_0}{T_0}\right)}_{\Delta p_{\text{Kamin}}} + \underbrace{st_{\text{Brand}} \cdot L_{\text{Brand}} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{T_{\text{Brand}} - T_0}{T_0}}_{\Delta p_{\text{Brand}}} + \underbrace{(-) p_{\text{Meteo}}}_{\Delta p_{\text{Meteo}}}$$

Reibung und Portalverluste (Einström- und Ausströmverluste) können zu  $\Delta p_{\text{Geometrie}}$  zusammengefasst werden. Es ergibt sich:

$$\underbrace{\frac{dv}{dt} \cdot L \cdot \rho}_{\Delta p_{\text{Imp}}} = \underbrace{\left(-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot |v| \cdot \left(\kappa_{\text{PL}} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}} + \kappa_{\text{PR}}\right)\right)}_{\Delta p_{\text{Geometrie}}} \quad 2-70$$

$$+ \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{\text{Fz}} \cdot c_w \cdot A_{\text{Fz}}}{A_{\text{T}}} \cdot (v_{\text{Fz}} - v) \cdot |v_{\text{Fz}} - v|}_{\Delta p_{\text{Fz}}} + \underbrace{\frac{n_{\text{SV,ist}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot (v_{\text{SV}} - v) \cdot v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} \cdot A_{\text{T}}}}_{\Delta p_{\text{SV}}}$$

$$+ \underbrace{st_{\text{T}} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\frac{T_{\text{T}} - T_0}{T_0}\right)}_{\Delta p_{\text{Kamin}}} + \underbrace{st_{\text{Brand}} \cdot L_{\text{Brand}} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{T_{\text{Brand}} - T_0}{T_0}}_{\Delta p_{\text{Brand}}} + \underbrace{(-) p_{\text{Meteo}}}_{\Delta p_{\text{Meteo}}}$$

## 2.5.2 Modell Tunnel bei Stau und ohne äussere Stördrücke (Tunnel LL)

Die Druckwirkungen  $\Delta p_{\text{Kamin}}$ ,  $\Delta p_{\text{Brand}}$  und  $\Delta p_{\text{Meteo}}$  sind äussere Stördrücke. Diese können für die Regelung des Systems weggelassen werden. Die Regelung soll diese Stördrücke ausgleichen.

$$\Delta p_{\text{Kamin}} = 0$$

$$\Delta p_{\text{Brand}} = 0$$

$$\Delta p_{\text{Meteo}} = 0$$

Im Brandfall kann weiter davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge still stehen.

Es gilt somit:

$$v_{\text{Fz}} = 0$$

Die Reibungsverluste durch Geometrie und Fahrzeuge können zusammengefasst werden.

Es ergibt sich:

$$\underbrace{\frac{dv}{dt} L \rho}_{\Delta p_{\text{Imp}}} = - \frac{1}{2} \rho \underbrace{\left( \kappa_{\text{PL}} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}} + \kappa_{\text{PR}} + \frac{n_{\text{Fz}} c_w A_{\text{Fz}}}{A_{\text{T}}} \right)}_{\Delta p_{\text{Geometrie+FZ}}} \cdot v \cdot |v| + \underbrace{\frac{\rho A_{\text{SV}} (v_{\text{SV}} - v) v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} A_{\text{T}}}}_{\Delta p_{\text{SV}}} \cdot n_{\text{SV\_ist}} \quad 2-71$$

Das Modell des Tunnels bei Stau und ohne äussere Stördrücke hat nur noch einen Eingang: die Anzahl Strahlventilatoren  $n_{\text{SV\_ist}}$ . Das Modell des Tunnels ohne Absaugung bei Stau und ohne äussere Stördrücke wird im folgenden vereinfacht Modell Tunnel LL genannt.

Abb. 2.22 zeigt das Schema des Modells Tunnel bei Stau und ohne äussere Stördrücke (Modell Tunnel LL).

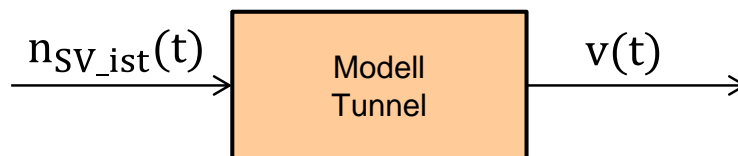


Abb. 2.22 Schema des Modells Tunnel LL (bei Stau und ohne äussere Stördrücke)

Der Druck infolge Reibungsverluste ( $\Delta p_{\text{Geometrie+Fz}}$ ) ist quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Um ein lineares zeitinvariantes System (LTI-System) zu bekommen, muss dieser Teil linearisiert, oder durch ein lineares Modell ersetzt werden.

Der Druck der Strahlventilatoren ( $\Delta p_{\text{SV}}$ ) ist sowohl von der Anzahl Strahlventilatoren als auch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

## 2.5.3 Vereinfachte Differentialgleichung für das Modell Tunnel LL

Mit dem vereinfachten Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren (siehe Gleichung 2-26) kann die Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit näherungsweise ausgeschlossen werden.

$$\Delta p_{\text{SV}} \approx \frac{\rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot v_{\text{SV}}^2}{k_{\text{SV}} \cdot A_{\text{T}}} \cdot n_{\text{SV\_ist}} \quad 2-72$$

Mit dem vereinfachten Modell des Strahlventilators ergibt sich:

$$\frac{dv}{dt} = - \underbrace{\left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}_{=a_T} \cdot v \cdot |v| + \underbrace{\frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T}}_{=b_T} \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-73$$

Es werden die Konstanten  $a_T$  und  $b_T$  definiert:

$$a_T = \frac{\left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}{2 \cdot L} \quad 2-74$$

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \quad 2-75$$

Mit:

$a_T$	Widerstandskonstante des Tunnels	[1/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]

Mit den definierten Konstanten  $a_T$  und  $b_T$ , lässt sich die Differentialgleichung des nicht linearen Modells (NLM) schreiben als:

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + \frac{b_T}{v_{SV}} \cdot (v_{SV} - v) \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-76$$

Und mit dem vereinfachten Modell der Druckerzeugung durch Strahlventilatoren gilt:

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-77$$

## 2.5.4 Herleitung der Sprungantwort des nichtlinearen Modells Tunnel LL

Die Sprungantwort des nicht-linearen Modells Tunnel LL kann analytisch hergeleitet werden, aber nur unter folgenden Bedingungen:

- Die Druckwirkung der Strahlventilatoren muss unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit modelliert werden (vereinfachte Differentialgleichung des Tunnels)
- Die Einschaltverzögerung der Strahlventilatoren wird ignoriert (oder als Totzeit modelliert).

Für die vereinfachte Differentialgleichung des nicht linearen Systems LL (Druckwirkung der Strahlventilatoren unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit) gilt:

$$\frac{dv}{dt} = \dot{v} = -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-78$$

Für  $v > 0$  gilt:

$$\dot{v} = -a_T \cdot v^2 + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-79$$

Es wird folgender Ansatz gewählt:

$$v(t) = \frac{1}{a_T} \cdot \frac{\dot{z}(t)}{z(t)} \quad 2-80$$

Abgeleitet ergibt das:

$$\dot{v}(t) = \frac{1}{a_T} \cdot \left( \frac{\ddot{z} \cdot z - \dot{z}^2}{z^2} \right) \quad 2-81$$

Eingesetzt in die Differentialgleichung ergibt sich:

$$\frac{1}{a_T} \cdot \left( \frac{\dot{z} \cdot z - \dot{z}^2}{z^2} \right) = -a_T \cdot \left( \frac{1}{a_T} \right)^2 \cdot \left( \frac{\dot{z}(t)}{z(t)} \right)^2 + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 2-82$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich:

$$\ddot{z}(t) = a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \cdot z(t) \quad 2-83$$

Aus der nichtlinearen Differentialgleichung wurde jetzt eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit der Funktion  $z(t)$ .

Um diese Differentialgleichung zu lösen wird vorerst folgende Vereinfachung angenommen:

$$n_{SV\_ist} = n_{SV\_soll} = n_{SV} \quad 2-84$$

Für die Sprungfunktion des Eingangssignals gilt:

$$n_{SV\_ist} = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ n_{SV}, & t > 0 \end{cases} \quad 2-85$$

Für die Differentialgleichung gilt somit bei  $t > 0$ :

$$\ddot{z}(t) = a_T b_T n_{SV} \cdot z(t) \quad 2-86$$

Es wird folgender Ansatz gemacht:

$$z(t) = a \cdot \sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) + b \cdot \cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \quad 2-87$$

Mit:

a                    Konstante

b                    Konstante

Es gilt dann:

$$\dot{z}(t) = \sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot \left( a \cdot \cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) + b \cdot \sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \right) \quad 2-88$$

Und:

$$\ddot{z}(t) = a_T b_T n_{SV} \cdot \left( a \cdot \sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) + b \cdot \cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \right) \quad 2-89$$

Für die Geschwindigkeit gilt dann:

$$v(t) = \frac{1}{a_T} \cdot \frac{\dot{z}(t)}{z(t)} = \sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}} \cdot \frac{\left( a \cdot \cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) + b \cdot \sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \right)}{\left( a \cdot \sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) + b \cdot \cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \right)} \quad 2-90$$

Für  $t = 0$  gilt:

$$v(t = 0) = 0 \quad 2-91$$

Und somit muss gelten:

$$a = 0 \quad 2-92$$

Für die Sprungantwort ergibt sich:

$$v(t) = \frac{1}{a_T} \cdot \frac{\dot{z}(t)}{z(t)} = \sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}} \cdot \frac{\sinh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t)}{\cosh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t)} \quad 2-93$$

Und nach einer Umformung:

$$v(t) = \underbrace{\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}}_{v_{\text{end}}} \cdot \tanh\left(\underbrace{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}_{\frac{1}{\tau_T}} \cdot t\right) \quad 2-94$$

Für die Endgeschwindigkeit der Sprungantwort  $v_{\text{end}}$  gilt:

$$v_{\text{end}} = \sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}} \quad 2-95$$

Für die Zeitkonstante  $\tau_T$  des Tunnels gilt:

$$\tau_T = \frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}} \quad 2-96$$

Abb. 2.23 zeigt die Sprungantwort des Tunnels Gotschna (nichtlineares Modell) mit  $n_{SV} = 24$ .

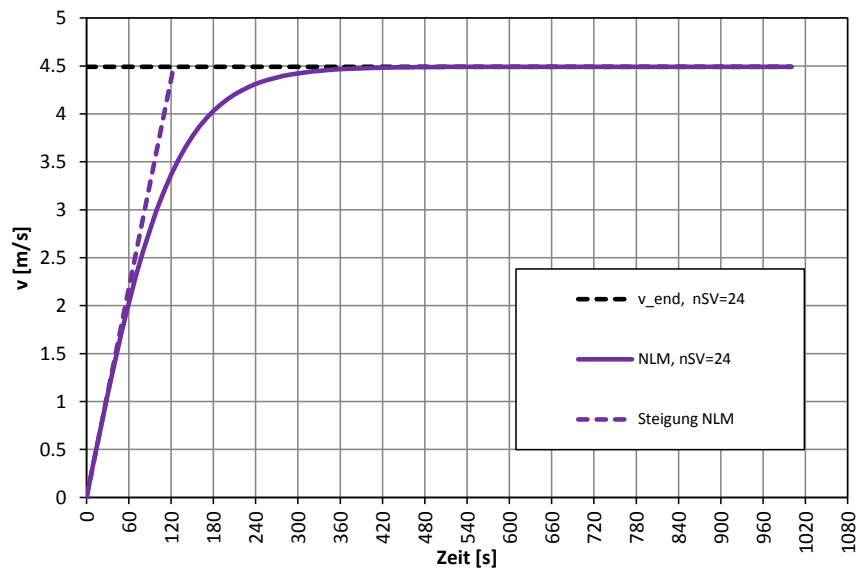


Abb. 2.23 Sprungantwort des Tunnels Gotschna LL - nichtlineares Modell (mit  $n_{SV} = 24$ )

## 2.5.5 Stationärer Zustand des Modells Tunnel LL

Die Endgeschwindigkeit  $v_{\text{end}}$ , auf welche sich die Sprungantwort annähert, kann aus der Differentialgleichung des nichtlinearen Modells des Tunnels hergeleitet werden.

Die Gleichung des nicht linearen Modells (NLM):

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + \frac{b_T}{v_{SV}} \cdot (v_{SV} - v) \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-97$$

Für die Sprungantwort des nicht linearen Modells mit 24 SV gilt:

$$n_{SV\_soll} = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 24, & t > 0 \end{cases} \quad 2-98$$

Für  $t \rightarrow \infty$  gilt:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dv}{dt} = 0 = -a_T \cdot v_{end}^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV}}{v_{SV}} \cdot (v_{SV} - v_{end}) \quad 2-99$$

Somit gilt:

$$v_{end}^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T \cdot v_{SV}} \cdot v_{end} - \frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T} \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} 0 \quad 2-100$$

Das ist eine quadratische Gleichung für  $v_{end}$  mit der positiven Lösung:

$$v_{end} \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} -\frac{b_T \cdot n_{SV}}{2 \cdot a_T \cdot v_{SV}} + \sqrt{\left(\frac{b_T \cdot n_{SV}}{2 \cdot a_T \cdot v_{SV}}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T}} \quad 2-101$$

Die Endgeschwindigkeit  $v_{end}$ , kann auch aus der vereinfachten Differentialgleichung des nichtlinearen Systems hergeleitet werden.

Die vereinfachte Differentialgleichung des nicht linearen Systems (NLM):

$$\frac{dv}{dt} \approx -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 2-102$$

Für  $t \rightarrow \infty$  gilt entsprechend:

$$v_{end}^2 \stackrel{t \rightarrow \infty}{\approx} \frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T} \quad 2-103$$

Umgeformt:

$$v_{end} \stackrel{t \rightarrow \infty}{\approx} \sqrt{\frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T}} \quad 2-104$$

Durch Umformung dieser Gleichung kann die benötigte Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV\_soll}$  hergeleitet werden, um eine bestimmte Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{soll}$  zu erreichen.

$$n_{SV\_soll} \approx \frac{a_T \cdot v_{soll}^2}{b_T} \quad 2-105$$

Auch die Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_{T\_soll}$  bei einer bestimmten Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{soll}$  kann hergeleitet werden:

$$\tau_{T\_soll} = \frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV\_soll}}} = \frac{1}{a_T \cdot v_{soll}} \quad 2-106$$

## 2.5.6 Herleitung der Sprungantwort Modells Tunnel LL unter Berücksichtigung der limitierten SV-Einschaltrate

In Kapitel 2.2.2 wurde die zeitliche Verzögerung beim Einschalten mehrerer Strahlventilatoren modelliert.

Hier soll die Sprungantwort im Tunnel unter Berücksichtigung dieser limitierten SV-Einschaltrate hergeleitet werden. Von besonderem Interesse ist die Totzeit, welche durch die limitierte Einschalttrate entsteht.

In einem ersten Schritt wird die Rampenantwort des Systems hergeleitet.

In einem zweiten Schritt wird die Rampenantwort einem Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit angenähert.

### Herleitung Rampenantwort

Das Eingangssignal ist eine begrenzte Rampe. Sie wurde bereits in Kapitel 2.2.2 modelliert.

Für die Schaltzeit der Strahlventilatoren  $T_{SV\_SZ}$  wird angenommen:

$$T_{SV\_SZ} = 5 \text{ [s]} \quad 2-107$$

Für die maximale Einschalttrate der Strahlventilatoren  $m_{SV\_max}$  gilt somit:

$$m_{SV\_max} = m_{SV} = \frac{1}{T_{SV\_SZ}} = 0.2 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right] \quad 2-108$$

Mit:

$m_{SV\_max}$	Maximale Einschalttrate der Strahlventilatoren	[1/s]
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit der Strahlventilatoren	[s]

Für die Zeitdauer der Rampe  $T_R$  ergibt sich:

$$T_R = n_{SV} \cdot T_{SV\_SZ} \quad 2-109$$

Mit:

$T_R$	Zeitdauer der Rampe	[s]
$n_{SV}$	Anzahl Strahlventilatoren	[-]
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit der Strahlventilatoren	[s]

Für die SV-Rampe gilt im Zeitbereich:

$$n_{SV\_soll\_Rampe} = \begin{cases} m_{SV} \cdot t, & t < T_R \\ n_{SV\_soll}, & t \geq T_R \end{cases} \quad 2-110$$

Abb. 2.24 zeigt die SV-Rampe (zeitliche Verzögerung beim sprunghaften Einschalten) von 24 Strahlventilatoren.

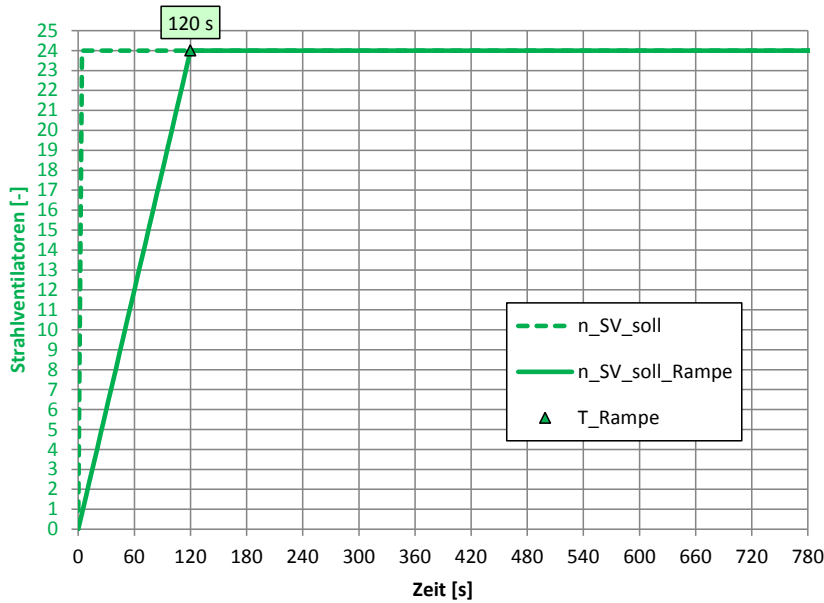


Abb. 2.24 SV-Rampe (zeitliche Verzögerung beim sprunghaften Einschalten) von 24 SV

Als Tunnelmodell wird vereinfacht das Modell als Tiefpass 1. Ordnung verwendet (siehe Kapitel 3.2). Für die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpasses 1. Ordnung gilt:

$$G_{T\_PT1TZ}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll\_Rampe}(s)} = K_T \cdot \frac{1}{(\tau_T \cdot s + 1)} = K_T \cdot \frac{\frac{1}{\tau_T}}{\left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \quad 2-111$$

Mit:

$K_T$                     Verstärkungsfaktor des Tunnels                    [m/s]  
 $\tau_T$                     Zeitkonstante des Tunnels                    [1/s]

Mit:

$$K_T = K_{T\_PT1} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV}}} \quad 2-112$$

$$\tau_T = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}} \quad 2-113$$

Im Frequenzbereich gilt für die Rampe (siehe Kapitel 2.2.2):

$$n_{SV\_soll\_Rampe}(s) = \frac{m_{SV}}{s^2} \cdot (1 - e^{-T_R \cdot s}) \quad 2-114$$

Somit gilt:

$$\frac{v(s)}{\underbrace{\frac{m_{SV}}{s^2} \cdot (1 - e^{-T_R \cdot s})}_{n_{SV\_soll\_Rampe}}} = K_T \cdot \frac{\frac{1}{\tau_T}}{\left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \quad 2-115$$

Umgeformt und erweitert:

$$v(s) = K_T \cdot m_{SV} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_T} + s - s}{s^2 \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \cdot (1 - e^{-T_R \cdot s}) \quad 2-116$$

Umgeformt:

$$v(s) = K_T \cdot m_{SV} \cdot \left( \frac{\frac{1}{\tau_T} + s}{s^2 \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} - \frac{s}{s^2 \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \right) \cdot (1 - e^{-T_R \cdot s}) \quad 2-117$$

Weiter umgeformt:

$$v(s) = K_T \cdot m_{SV} \cdot \left( \frac{1}{s^2} - \frac{1}{s \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \right) \cdot (1 - e^{-T_R \cdot s}) \quad 2-118$$

Ausmultipliziert und erweitert:

$$v(s) = K_T m_{SV} \cdot \left( \left( \frac{1}{s^2} - \tau_T \frac{\frac{1}{\tau_T}}{s \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \right) - \left( \frac{1}{s^2} - \tau_T \frac{\frac{1}{\tau_T}}{s \left(s + \frac{1}{\tau_T}\right)} \right) e^{-T_R \cdot s} \right) \quad 2-119$$

Diese Gleichung kann jetzt wieder in den Zeitbereich umgewandelt werden:

$$v(t) = \begin{cases} K_T m_{SV} \left( t - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \right), & t < T_R \\ K_T m_{SV} \left( t - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) - \left( (t - T_R) - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{t - T_R}{\tau_T}} \right) \right) \right), & t \geq T_R \end{cases} \quad 2-120$$

Durch einige Vereinfachungen ergibt sich somit für die Rampenantwort:

$$v(t) = \begin{cases} K_T m_{SV} \left( t - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \right), & t < T_R \\ K_T m_{SV} \left( T_R + \tau_T \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_T}} - e^{-\frac{t - T_R}{\tau_T}} \right) \right), & t \geq T_R \end{cases} \quad 2-121$$

Abb. 2.25 zeigt die SV-Rampe (grün) und die Rampenantwort für System als PT1 (rot).

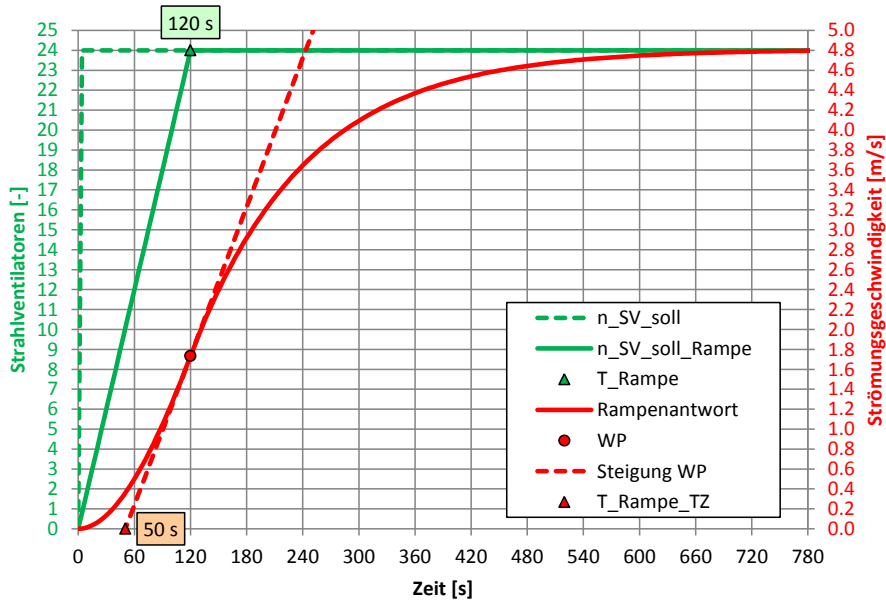


Abb. 2.25 SV-Rampe (grün) und Rampenantwort für System als PT1 (rot) (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $n_{SV} = 24$ )

Die Totzeit, welche durch die Rampe von 24 Strahlventilatoren verursacht wird, beträgt ca. 50 s.

### Herleitung Totzeit der Rampenantwort $T_{R\_TZ}$

Für die Rampenantwort gilt:

$$v(t) = \begin{cases} K_T m_{SV} \left( t - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \right), & t < T_R \\ K_T m_{SV} \left( T_R + \tau_T \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_T}} - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \right), & t \geq T_R \end{cases} \quad 2-122$$

Für die erste Ableitung der Rampenantwort gilt:

$$\dot{v}(t) = \begin{cases} K_T m_{SV} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right), & t < T_R \\ -K_T m_{SV} \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_T}} - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right), & t \geq T_R \end{cases} \quad 2-123$$

Für den Wendepunkt gilt:

$$T_{WP} = T_R \quad 2-124$$

Mit:

$T_{WP}$  Zeit beim Wendepunkt [s]

$T_R$  Zeitdauer der Rampe [s]

Für die Strömungsgeschwindigkeit im Wendepunkt gilt somit:

$$v_{WP} = v(t = T_R) = K_T m_{SV} \left( T_R - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \right) \quad 2-125$$

Für die Steigung der Wendetangente gilt:

$$m_{WP} = \dot{v}(t = T_R) = K_T m_{SV} \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \quad 2-126$$

Mit:

$$m_{WP} \quad \text{Steigung der Wendetangente} \quad [m/s^2]$$

Für die Gleichung der Wendetangente gilt:

$$y_{WT} = y_0 + m_{WP} \cdot t \quad 2-127$$

Mit:

$$y_{WT} \quad y\text{-Abschnitt der Gleichung der Wendetangente} \quad [m/s]$$

$$y_0 \quad y\text{-Achsenabschnitt der Gleichung der Wendetangente} \quad [m/s]$$

$$m_{WP} \quad \text{Steigung der Wendetangente} \quad [m/s^2]$$

Mit der Gleichung der Wendetangente gilt für den Wendepunkt:

$$v_{WP} = y_{WP} = y_0 + m_{WP} \cdot T_R = K_T m_{SV} \left( T_R - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \right) \quad 2-128$$

Mit:

$$v_{WP} \quad \text{Strömungsgeschwindigkeit im Wendepunkt} \quad [m/s]$$

Für den Achsenabschnitt der Wendetangente gilt somit:

$$y_0 = y_{WP} - m_{WP} \cdot T_R = K_T m_{SV} \left( T_R - \tau_T \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \right) - K_T m_{SV} \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \cdot T_R \quad 2-129$$

Umgeformt:

$$y_0 = K_T m_{SV} \left( -\tau_T + (T_R + \tau_T) \cdot e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right) \quad 2-130$$

Für die Totzeit der Rampenantwort  $T_{R,TZ}$  gilt somit:

$$y_{WT}(t = T_{R,TZ}) = 0 = y_0 + m_{WP} \cdot T_{R,TZ} \quad 2-131$$

Somit gilt:

$$T_{R,TZ} = -\frac{y_0}{m_{WP}} = -\frac{K_T m_{SV} \left( -\tau_T + (T_R + \tau_T) \cdot e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right)}{K_T m_{SV} \left( 1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}} \right)} \quad 2-132$$

Durch Umformungen ergibt sich für die Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ}$ :

$$T_{R\_TZ} = \frac{\tau_T - (T_R + \tau_T) \cdot e^{-\frac{T_R}{\tau_T}}}{\left(1 - e^{-\frac{T_R}{\tau_T}}\right)} \quad 2-133$$

Mit:

$T_{R\_TZ}$	Totzeit der Rampenantwort	[s]
$\tau_T$	Zeitkonstante des Tunnels	[s]
$T_R$	Zeitdauer der Rampe	[s]

Die Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_T$ , sowie die Rampendauer  $T_R$  als auch die Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ}$  sind abhängig von der Anzahl Strahlventilatoren. Abb. 2.26 zeigt die Abhängigkeit der Zeitkonstanten von der Anzahl Strahlventilatoren.

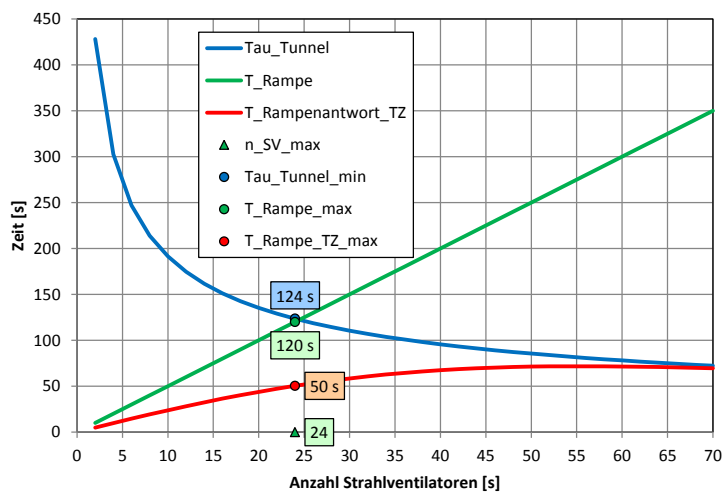


Abb. 2.26 Abhängigkeit der Zeitkonstanten von der Anzahl Strahlventilatoren beim System LL Gotschna

Für lange Rampen (bei einer sehr grossen Anzahl SV) nähert sich die Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ}$  der Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_T$  an.

Es gilt:

$$T_{R\_TZ} \underset{T_R \rightarrow \infty}{\approx} \tau_T \quad 2-134$$

Für die maximale Anzahl SV  $n_{SV\_max}$  im Gotschnatunnel gilt:

$$n_{SV\_max} = 24 \quad 2-135$$

Für die maximale Zeitdauer der Rampe  $T_{R\_max}$  gilt somit:

$$T_{R\_max} = n_{SV\_max} \cdot T_{SV\_SZ} = 24 \cdot 5 \text{ s} = 120 \text{ s} \quad 2-136$$

Für die minimale Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_{T\_min}$  gilt:

$$\tau_{T\_min} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_max}}} = 123.5 \text{ s} \quad 2-137$$

Für die maximale Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ\_max}$  gilt somit:

$$T_{R\_TZ\_max} = \frac{\tau_{T\_min} - (T_{R\_max} + \tau_{T\_min}) \cdot e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}}{\left(1 - e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}\right)} = 50.4 \text{ s} \quad 2-138$$

## 2.6 Modellierung eines Tunnels mit Absaugung (System ABS)

### 2.6.1 Herleitung der Differentialgleichung für das System ABS

Abb. 2.27 zeigt ein Schema eines Tunnels mit verschiedenen Druckwirkungen mit Absaugung.

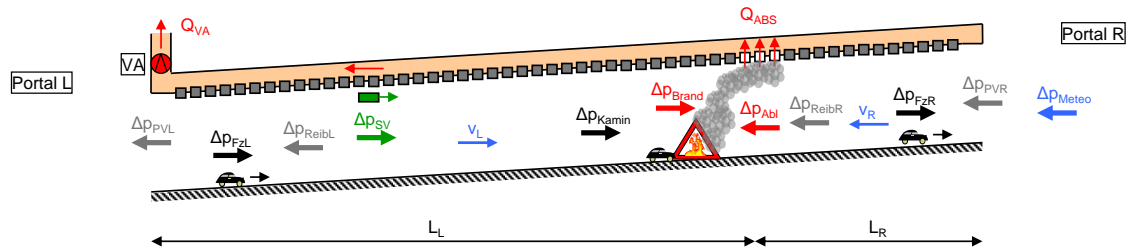


Abb. 2.27 Schema eines Tunnels mit verschiedenen Druckwirkungen mit Absaugbetrieb

Für die Strömungsgeschwindigkeiten  $v_L$  und  $v_R$  gelten:

Richtung der Strömungsgeschwindigkeit  $L \rightarrow R$ :  $v > 0$

Richtung der Strömungsgeschwindigkeit  $L \leftarrow R$ :  $v < 0$

Statische Druckänderungen bei Zu- und Abluft ergeben sich einerseits durch die Beschleunigung bzw. Verzögerung der Strömung und andererseits durch lokale Strömungswiderstände bzw. zusätzlichen Impulse bei gerichteter Einblasung.

Tatsächlich sind empirische Verlustkoeffizienten in Abhängigkeit der Geometrie und des Verhältnisses der Luftmengen einzusetzen. Allgemein ergibt sich für den Totaldruck entlang der Tunnelachse

$$\Delta p_{\text{Zu-/Abluft}} = -\frac{k}{2} \cdot \rho \cdot \Delta(v^2) \quad 2-139$$

Mit:

$\Delta p_{\text{Zu-/Abluft}}$	Druck infolge Zu- oder Abluft	[Pa]
$k$	Empirischer Verlustkoeffizient	[-]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]

Geht man von einer unvollständigen Absaugung der Längsströmung im Tunnel aus, kann näherungsweise die Stromfadentheorie (Bernoulli-Gleichung ohne Verlustfaktoren) angewendet werden. Es ergibt sich

$$k \approx 0 \quad 2-140$$

Und damit

$$\Delta p_{\text{Abluft}} = -\frac{k}{2} \cdot \rho \cdot \Delta(v^2) \approx 0 \text{ Pa} \quad 2-141$$

Es ist anzumerken, dass bei einer symmetrisch angeströmten Absaugstelle, wie sie dem Endzustand der Regelung entsprechen soll, die Stromfadentheorie nicht mehr angewendet werden kann. Die Näherung  $\Delta p_{\text{Abluft}} \approx 0 \text{ Pa}$  führt jedoch weiterhin zu sinnvollen Ergebnissen.

Für die Modellierung eines Tunnels mit lokaler Absaugung sind daher lediglich die Reibungsterme der beiden Tunnelabschnitte zusammen zu zählen.

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{dv_L}{dt} \cdot L_L \cdot \rho + \frac{dv_R}{dt} \cdot L_R \cdot \rho}_{\Delta p_{\text{Imp}}} \\
 &= \underbrace{\left( - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_L \cdot |v_L| \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L_L}{D_{\text{hyd}}} \right) + \left( - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_R \cdot |v_R| \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L_R}{D_{\text{hyd}}} \right) \right)}_{\Delta p_{\text{Reib}}} \\
 &+ \underbrace{\left( - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_L \cdot |v_L| \cdot \kappa_{\text{PL}} \right)}_{\Delta p_{\text{PV1}}} + \underbrace{\left( - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_R \cdot |v_R| \cdot \kappa_{\text{PR}} \right)}_{\Delta p_{\text{PV2}}} \\
 &+ \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{\text{FzL}} \cdot c_w A_{\text{Fz}}}{A_T} \cdot (v_{\text{Fz}} - v_L) \cdot |v_{\text{Fz}} - v_L| + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{n_{\text{FzR}} \cdot c_w A_{\text{Fz}}}{A_T} \cdot (v_{\text{Fz}} - v_R) \cdot |v_{\text{Fz}} - v_R|}_{\Delta p_{\text{Fz}}} \\
 &+ \underbrace{\frac{n_{\text{SV\_ist\_L}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot (v_{\text{SV}} - v_L) \cdot v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} \cdot A_T} + \frac{n_{\text{SV\_ist\_R}} \cdot \rho \cdot A_{\text{SV}} \cdot (v_{\text{SV}} - v_R) \cdot v_{\text{SV}}}{k_{\text{SV}} \cdot A_T}}_{\Delta p_{\text{SV}}} \\
 &+ \underbrace{st_T \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \left( \frac{T_T - T_0}{T_0} \right)}_{\Delta p_{\text{Kamin}}} + \underbrace{st_{\text{Brand}} \cdot L_{\text{Brand}} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{T_{\text{Brand}} - T_0}{T_0}}_{\Delta p_{\text{Brand}}} + \underbrace{(-) P_{\text{Meteo}}}_{\Delta p_{\text{Meteo}}}
 \end{aligned}$$

Mit:

$v_L$	Strömungsgeschwindigkeit links von der Absaugung	[m/s]
$v_R$	Strömungsgeschwindigkeit rechts von der Absaugung	[m/s]
$L_L$	Länge des Abschnitts links von der Absaugung	[m]
$L_R$	Länge des Abschnitts rechts von der Absaugung	[m]
$n_{\text{FzL}}$	Anzahl Fahrzeuge im linken Lüftungsabschnitt	[-]
$n_{\text{FzR}}$	Anzahl Fahrzeuge im rechten Lüftungsabschnitt	[-]
$n_{\text{SV\_ist\_L}}$	Anzahl Strahlventilatoren im linken Abschnitt	[-]
$n_{\text{SV\_ist\_R}}$	Anzahl Strahlventilatoren im rechten Abschnitt	[-]

Für die Länge L des Tunnels gilt:

$$L = L_L + L_R \quad 2-143$$

Mit:

L	Länge des Tunnels	[m]
---	-------------------	-----

Für die Absaugmenge  $Q_{\text{ABS}}$  gilt:

$$Q_{\text{ABS}} = (v_L - v_R) \cdot A_T \cdot \frac{T_{\text{ABS}}}{T_T} \quad 2-144$$

Mit:

$Q_{\text{ABS}}$	Absaugvolumenstrom durch die Klappen	[m <sup>3</sup> /s]
$T_{\text{ABS}}$	Temperatur der abgesaugten Luft durch die Klappen	[K]
$T_T$	Temperatur der Tunnelluft	[K]

Unter der Vernachlässigung der Leckage im Abluftkanal gilt weiter:

$$Q_{VA} = Q_{ABS} = (v_L - v_R) \cdot A_T \cdot \frac{T_{VA}}{T_T} \quad 2-145$$

Mit:

$Q_{VA}$	Absaugvolumenstrom am Ventilator	$[m^3/s]$
$Q_{ABS}$	Absaugvolumenstrom durch die Klappen	$[m^3/s]$
$T_{ABS}$	Temperatur der abgesaugten Luft am Ventilator	$[K]$
$T_T$	Temperatur der Tunnelluft	$[K]$

Die Druckwirkungen  $\Delta p_{Kamin}$ ,  $\Delta p_{Brand}$  und  $\Delta p_{Meteo}$  sind äussere Stördrücke. Diese können für die Regelung des Systems weggelassen werden. Die Regelung soll diese Stördrücke ausgleichen.

$$\begin{aligned} \Delta p_{Kamin} &= 0 \\ \Delta p_{Brand} &= 0 \\ \Delta p_{Meteo} &= 0 \end{aligned}$$

Im Brandfall kann weiter davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge still stehen.

Es gilt somit:

$$v_{Fz} = 0$$

Die Reibungsverluste durch Geometrie und Fahrzeuge können zusammengefasst werden.

Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} &\underbrace{\frac{dv_L}{dt} \cdot L_L \cdot \rho + \frac{dv_R}{dt} \cdot L_R \cdot \rho}_{\Delta p_{Imp}} = \\ &\underbrace{-\frac{1}{2} \rho \cdot \left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda_{L_L}}{D_{hyd}} + \frac{n_{FzL} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \cdot v_L \cdot |v_L| - \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{\lambda_{L_R}}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{n_{FzR} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \cdot v_R \cdot |v_R|}_{\Delta p_{Geometrie+FZ}} \quad 2-146 \\ &+ \underbrace{\frac{n_{SV\_ist\_L} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_L) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T} + \frac{n_{SV\_ist\_R} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_R) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T}}_{\Delta p_{SV}} \end{aligned}$$

Für die Absaugmenge  $Q_{ABS}$  gilt jetzt:

$$Q_{ABS} = (v_L - v_R) \cdot A_T \quad 2-147$$

Die Länge des linken Tunnelstücks kann durch den Längenanteil des linken Lüftungsabschnitts  $X_L$  ausgedrückt werden. Es gilt somit:

$$L_L = X_L \cdot L \quad 2-148$$

Mit:

$X_L$	Längenanteil des linken Lüftungsabschnitts	$[-]$
-------	--	-------

Für das Rechte Tunnelstück ergibt sich:

$$L_R = (1 - X_L) \cdot L \quad 2-149$$

Für die Anzahl Fahrzeuge im Tunnel gilt:

$$n_{FzL} = X_L \cdot n_{Fz} \quad 2-150$$

$$n_{FzR} = (1 - X_L) \cdot n_{Fz} \quad 2-151$$

Mit:

$$n_{FzL} \quad \text{Anzahl Fahrzeuge im linken Lüftungsabschnitt} \quad [-]$$

$$n_{FzR} \quad \text{Anzahl Fahrzeuge im rechten Lüftungsabschnitt} \quad [-]$$

$$n_{Fz} \quad \text{Anzahl Fahrzeuge im Tunnel} \quad [-]$$

Die Strömungsgeschwindigkeit im rechten Tunnelstück kann durch den Abluftvolumenstrom und die Strömungsgeschwindigkeit im linken Tunnelstück ausgedrückt werden.

$$v_R = \left( v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \right) \quad 2-152$$

Die Differentialgleichung lässt sich somit schreiben als:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{dv_L}{dt} \cdot X_L \cdot L \cdot \rho}_{\Delta p_{Imp\_Links}} + \underbrace{\frac{d\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}{dt} \cdot (1 - X_L) \cdot L \cdot \rho}_{\Delta p_{Imp\_Rechts}} = \\ & - \underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot \left( \kappa_{PL} + \frac{X_L \cdot \lambda L}{D_{hyd}} + \frac{X_L \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \cdot v_L \cdot |v_L|}_{\Delta p_{Geometrie+Fz\_Links}} \\ & - \underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{(1 - X_L) \cdot \lambda L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{(1 - X_L) \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \cdot \left( v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \right) \cdot \left| \left( v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \right) \right|}_{\Delta p_{Geometrie+Fz\_Rechts}} \\ & + \underbrace{\frac{n_{SV\_ist\_L} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_L) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T}}_{\Delta p_{SV\_Links}} + \underbrace{\frac{n_{SV\_ist\_R} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_R) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T}}_{\Delta p_{SV\_Rechts}} \end{aligned} \quad 2-153$$

Durch einige Umformungen lässt sich die Differentialgleichung schreiben als:

$$\begin{aligned} & \frac{dv_L}{dt} \cdot X_L + \frac{d\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}{dt} \cdot (1 - X_L) = \\ & - \frac{\left( \kappa_{PL} + \frac{X_L \cdot \lambda L}{D_{hyd}} + \frac{X_L \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}{2L_T} \cdot v_L \cdot |v_L| \\ & - \frac{\left( \frac{(1 - X_L) \cdot \lambda L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{(1 - X_L) \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}{2L_T} \cdot \left( v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \right) \cdot \left| \left( v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \right) \right| \\ & + \frac{n_{SV\_ist\_L} \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_L) \cdot v_{SV}}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} + \frac{n_{SV\_ist\_R} \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v_R) \cdot v_{SV}}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \end{aligned} \quad 2-154$$

## 2.6.2 Vereinfachte Differentialgleichung für das System ABS

Mit dem vereinfachten Modell des Strahlventilators ergibt sich:

$$\Delta p_{SV} \approx \frac{n_{SV\_ist\_L} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T} + \frac{n_{SV\_ist\_R} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T} = \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T} \quad 2-155$$

Mit:

$n_{SV\_ist\_L}$	Anzahl Strahlventilatoren im linken Abschnitt	[-]
$n_{SV\_ist\_R}$	Anzahl Strahlventilatoren im rechten Abschnitt	[-]
$n_{SV\_ist}$	Anzahl Strahlventilatoren total	[-]

Wobei:

$$n_{SV\_ist} = n_{SV\_ist\_L} + n_{SV\_ist\_R} \quad 2-156$$

Mit dem vereinfachten Modell der Strahlventilatoren ist es egal, ob die Strahlventilatoren im linken oder im rechten Tunnelabschnitt platziert sind.

Die Differentialgleichung lässt sich somit vereinfacht schreiben als:

$$\begin{aligned} \frac{dv_L}{dt} \cdot X_L + \frac{d\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}{dt} \cdot (1 - X_L) = \\ - \frac{\left(\kappa_{PL} + \frac{\lambda X_L \cdot L_T}{D_{hyd}} + \frac{X_L \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T}\right)}{2 \cdot L} \cdot v_L \cdot |v_L| \\ - \frac{\left(\frac{\lambda(1 - X_L) \cdot L_T}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{(1 - X_L) \cdot n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T}\right)}{2 \cdot L} \cdot \left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)\right| \\ + \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \cdot n_{SV\_ist} \end{aligned} \quad 2-157$$

Es werden die folgenden Konstanten definiert:

$$a_{TL} = \frac{\left(\kappa_{PL} + X_L \cdot \left(\frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T}\right)\right)}{2 \cdot L} \quad 2-158$$

$$a_{TR} = \frac{\left(\kappa_{PR} + (1 - X_L) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T}\right)\right)}{2 \cdot L} \quad 2-159$$

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \quad 2-160$$

Mit:

$a_{TL}$	Widerstandskonstante des linken Lüftungsabschnitts	[1/m]
$a_{TR}$	Widerstandskonstante des rechten Lüftungsabschnitts	[1/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]

Die Differentialgleichung lässt sich somit vereinfacht schreiben als:

$$\frac{dv_L}{dt} \cdot X_L + \frac{d\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}{dt} \cdot (1 - X_L) =$$

$$-a_{TL} \cdot v_L \cdot |v_L| - a_{TR} \cdot \left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right| + b_T \cdot n_{SV\_ist}$$
2-161

### 2.6.3 Differentialgleichung des Systems ABS bei stationärer Absaugung

Für die stationäre Absaugung gilt:

$$\frac{d\left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}{dt} = 0$$
2-162

Es ergibt sich somit:

$$\frac{dv_L}{dt} = -a_{TL} \cdot v_L \cdot |v_L| - a_{TR} \cdot \left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right| + b_T \cdot n_{SV\_ist}$$
2-163

### 2.6.4 Stationärer Zustand des Systems ABS

Für den stationären Zustand gilt:

$$\frac{dv_L}{dt} \underset{\substack{\Downarrow \\ t \rightarrow \infty}}{=} 0$$
2-164

Und somit:

$$0 = -a_{TL} \cdot v_L \cdot |v_L| - a_{TR} \cdot \left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right| + b_T \cdot n_{SV\_ist}$$
2-165

$$0 = v_L \cdot |v_L| + \underbrace{\frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{v_R} \cdot \underbrace{\left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{|v_R|} - \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{a_{TL}}$$
2-166

Für die Richtungen der Strömungsgeschwindigkeiten  $v_R$  und  $v_L$  gibt es 3 Kombinationen und 2 Grenzfälle:

Fall	Schema	$v_L$	$v_R$	$n_{SV}$
1		$v_L < 0$	$v_R < -\frac{Q_{ABS}}{A_T}$	$n_{SV} < n_{SV\_krit\_neg}$
2		$v_L = 0$	$v_R = -\frac{Q_{ABS}}{A_T}$	$n_{SV} = n_{SV\_krit\_neg}$
3		$0 < v_L < \frac{Q_{ABS}}{A_T}$	$-\frac{Q_{ABS}}{A_T} < v_R < 0$	$n_{SV\_krit\_neg} < n_{SV}$ $n_{SV} < n_{SV\_krit\_pos}$
4		$v_L = \frac{Q_{ABS}}{A_T}$	$v_R = 0$	$n_{SV} = n_{SV\_krit\_pos}$
5		$v_L > \frac{Q_{ABS}}{A_T}$	$v_R > 0$	$n_{SV} > n_{SV\_krit\_pos}$

Tab. 2.1 Verschiedene Fälle für System Absaugung

Für die kritischen Grenzfälle 2 und 4 gilt:

Fall 2:

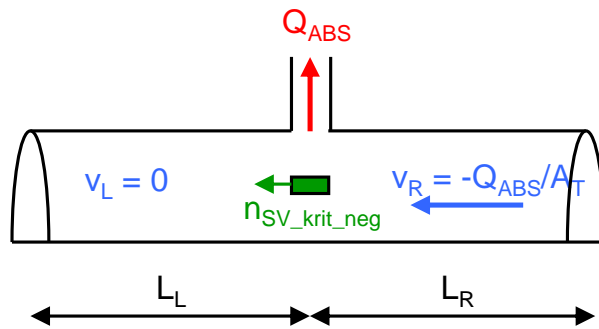


Abb. 2.28 Schema System Absaugung, Grenzfall 2

Es gilt:

$$v_L = 0 \quad 2-167$$

$$v_R = -\frac{Q_{ABS}}{A_T} \quad 2-168$$

$$n_{SV_{ist}} = n_{SV_{krit\_neg}} \quad 2-169$$

Für die Differentialgleichung gilt:

$$0 = \underbrace{v_L}_{=0} \cdot \underbrace{|v_L|}_{=0} + \frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{v_R = -\frac{Q_{ABS}}{A_T}} \cdot \underbrace{\left|\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)\right|}_{|v_R| = \frac{Q_{ABS}}{A_T}} - \frac{b_T \cdot \widehat{n_{SV_{ist}}}}{a_{TL}} \stackrel{=n_{SV_{krit\_neg}}}{=} \quad 2-170$$

Und somit:

$$n_{SV_{krit\_neg}} = -\frac{a_{TR}}{b_T} \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 \quad 2-171$$

## Fall 4:

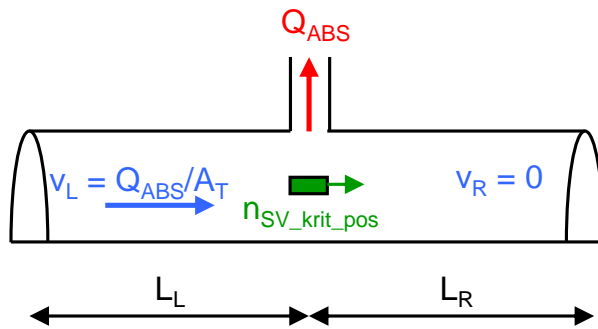


Abb. 2.29 Schema System Absaugung, Grenzfall 4

Es gilt:

$$v_L = \frac{Q_{ABS}}{A_T} \quad 2-172$$

$$v_R = 0 \quad 2-173$$

$$n_{SV_{ist}} = n_{SV_{krit\_pos}} \quad 2-174$$

Für die Differentialgleichung gilt:

$$0 = \underbrace{v_L}_{\frac{Q_{ABS}}{A_T}} \cdot \underbrace{|v_L|}_{\frac{Q_{ABS}}{A_T}} + \frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{v_R=0} \cdot \underbrace{\left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{|v_R|=0} - \frac{b_T \cdot \widehat{n_{SV_{ist}}}}{a_{TL}} \quad 2-175$$

Und somit:

$$n_{SV_{krit\_pos}} = \frac{a_{TL}}{b_T} \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 \quad 2-176$$

Für die Fälle 1, 3 und 5 gilt:

Fall 1:

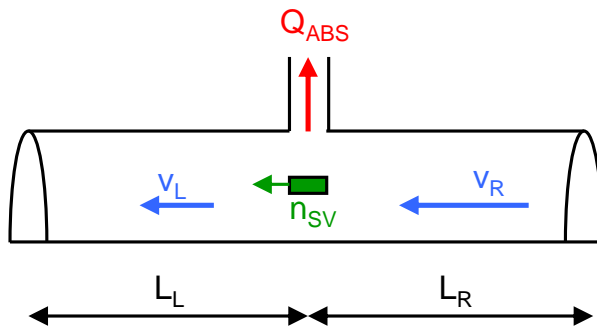


Abb. 2.30 Schema System Absaugung, Fall 1

Für den Fall 1 muss gelten:

$$n_{SV} < n_{SV\_krit\_neg} \quad 2-177$$

Für die Strömungsgeschwindigkeiten gilt:

$$\underbrace{v_L}_{<0} \cdot \underbrace{|v_L|}_{>0} \stackrel{\text{Fall1}}{=} \underbrace{-v_L^2}_{<0} \quad 2-178$$

$$\underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{<0} \cdot \underbrace{\left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{>0} \stackrel{\text{Fall1}}{=} \underbrace{-\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2}_{<0} \quad 2-179$$

Für die Differentialgleichung gilt:

$$0 \stackrel{\text{Fall1}}{=} \underbrace{\frac{v_L \cdot |v_L|}{-v_L^2}} + \frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{-\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2} - \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{a_{TL}} \quad 2-180$$

Nach Umformungen ergibt sich folgende quadratische Gleichung:

$$0 \stackrel{\text{Fall1}}{=} v_L^2 + \underbrace{-2 \frac{a_{TR}}{(a_{TL} + a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T}}_b \cdot v_L + \underbrace{\left(\frac{a_{TR}}{(a_{TL} + a_{TR})} \cdot \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} + a_{TR})}\right)}_c \quad 2-181$$

Die Lösung der Quadratischen Gleichung:

$$v_L \stackrel{\text{Fall1}}{=} \frac{a_{TR}}{(a_{TL} + a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T} \pm \sqrt{-\frac{a_{TR} a_{TL}}{(a_{TL} + a_{TR})^2} \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 - \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} + a_{TR})}} \quad 2-182$$

## Fall 3:

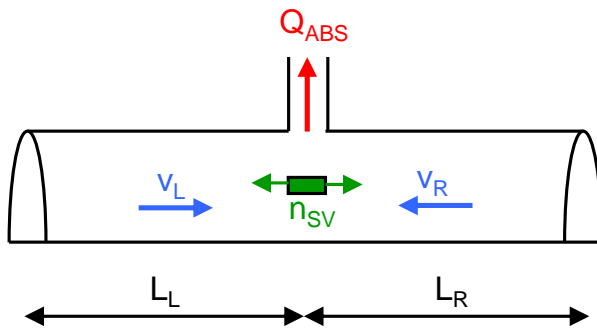


Abb. 2.31 Schema System Absaugung, Fall 3

Für den Fall 3 muss gelten:

$$n_{SV\_krit\_neg} < n_{SV} < n_{SV\_krit\_pos} \quad 2-183$$

Für die Strömungsgeschwindigkeiten gilt:

$$\underbrace{v_L}_{>0} \cdot \underbrace{|v_L|}_{>0} \stackrel{\text{Fall 3}}{=} \underbrace{v_L^2}_{<0} \quad 2-184$$

$$\underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{<0} \cdot \underbrace{\left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{>0} \stackrel{\text{Fall 3}}{=} \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2}_{<0} \quad 2-185$$

Für die Differentialgleichung gilt:

$$0 \stackrel{\text{Fall 3}}{=} \underbrace{\frac{v_L \cdot |v_L|}{v_L^2}}_{>0} + \frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{-\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2} - \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{a_{TL}} \quad 2-186$$

Nach Umformungen ergibt sich folgende quadratische Gleichung:

$$0 \stackrel{\text{Fall 3}}{=} v_L^2 + \underbrace{2 \frac{a_{TR}}{(a_{TL} - a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T}}_b \cdot v_L - \underbrace{\left(\frac{a_{TR}}{(a_{TL} - a_{TR})} \cdot \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} - a_{TR})}\right)}_c \quad 2-187$$

Die Lösung der Quadratischen Gleichung:

$$v_L \stackrel{\text{Fall 3}}{=} - \frac{a_{TR}}{(a_{TL} - a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T} \pm \sqrt{\frac{a_{TR} a_{TL}}{(a_{TL} - a_{TR})^2} \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} - a_{TR})}} \quad 2-188$$

## Fall 5:

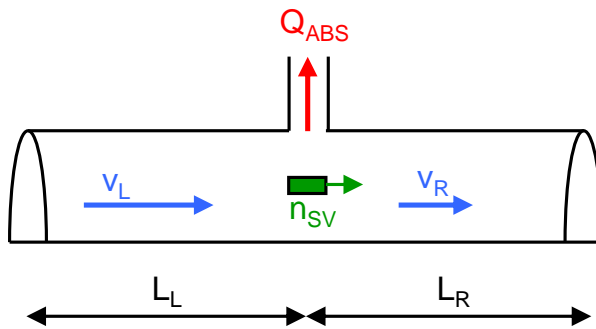


Abb. 2.32 Schema System Absaugung, Fall 5

Für den Fall 5 muss gelten:

$$n_{SV} > n_{SV\_krit\_pos} \quad 2-189$$

Für die Strömungsgeschwindigkeiten gilt:

$$\underbrace{v_L}_{>0} \cdot \underbrace{|v_L|}_{>0} \stackrel{\text{Fall 5}}{=} \underbrace{v_L^2}_{>0} \quad 2-190$$

$$\underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)}_{>0} \cdot \underbrace{\left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{>0} \stackrel{\text{Fall 5}}{=} \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2}_{>0} \quad 2-191$$

Für die Differentialgleichung gilt:

$$0 \stackrel{\text{Fall 5}}{=} \underbrace{\frac{v_L \cdot |v_L|}{v_L^2}}_{>0} + \frac{a_{TR}}{a_{TL}} \cdot \underbrace{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right) \cdot \left|v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right|}_{\left(v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2} - \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{a_{TL}} \quad 2-192$$

Nach Umformungen ergibt sich folgende quadratische Gleichung:

$$0 \stackrel{\text{Fall 5}}{=} v_L^2 + 2 \underbrace{\frac{a_{TR}}{(a_{TL} - a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T}}_b \cdot v_L - \underbrace{\left(\frac{a_{TR}}{(a_{TL} - a_{TR})} \cdot \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} - a_{TR})}\right)}_c \quad 2-193$$

Die Lösung der Quadratischen Gleichung:

$$v_L \stackrel{\text{Fall 5}}{=} \frac{a_{TR}}{(a_{TL} + a_{TR})} \frac{Q_{ABS}}{A_T} \pm \sqrt{-\frac{a_{TR} a_{TL}}{(a_{TL} + a_{TR})^2} \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(a_{TL} + a_{TR})}} \quad 2-194$$

Somit gibt es für die Fälle 1, 3 und 5 jeweils eine Quadratische Gleichung.

Mit einem Trick kann eine Lösung für alle 3 Fälle hergeleitet werden.

Die Konstanten  $a_{TL}$  und  $a_{TR}$  werden jeweils mit dem Vorzeichen der entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit multipliziert. Es ergeben sich die Konstanten  $\overline{a_{TL}}$  und  $\overline{a_{TR}}$ , welche je nach Fall positiv oder negativ sein können.

$$n_{SV} < n_{SV\_krit\_neg} \rightarrow \overline{a_{TL}} = -a_{TL} \quad 2-195$$

$$n_{SV} > n_{SV\_krit\_neg} \rightarrow \overline{a_{TL}} = +a_{TL} \quad 2-196$$

$$n_{SV} > n_{SV\_krit\_pos} \rightarrow \overline{a_{TR}} = +a_{TR} \quad 2-197$$

$$n_{SV} < n_{SV\_krit\_pos} \rightarrow \overline{a_{TR}} = -a_{TR} \quad 2-198$$

Jetzt kann die Strömungsgeschwindigkeit  $v_L$  durch eine Gleichung ausgedrückt werden:

$$v_L = \frac{\overline{a_{TR}}}{(\overline{a_{TL}} + \overline{a_{TR}})} \cdot \frac{Q_{ABS}}{A_T} + \frac{\overline{a_{TL}} + \overline{a_{TR}}}{|\overline{a_{TL}} + \overline{a_{TR}}|} \cdot \sqrt{-\frac{\overline{a_{TR}} \cdot \overline{a_{TL}}}{(\overline{a_{TL}} + \overline{a_{TR}})^2} \cdot \left(\frac{Q_{ABS}}{A_T}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV\_ist}}{(\overline{a_{TL}} + \overline{a_{TR}})}} \quad 2-199$$

## 2.6.5 Anzahl Strahlventilatoren für Symmetrische Strömung

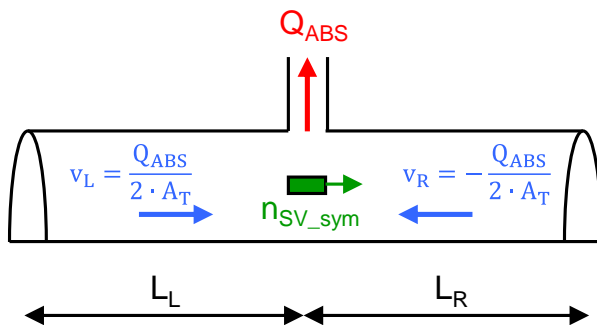


Abb. 2.33 Symmetrische Strömung

Für eine Absaugung mit symmetrischer Anströmung soll gelten:

$$v_L = -v_R = \frac{Q_{ABS}}{2 \cdot A_T} \quad 2-200$$

Für die Differentialgleichung gilt somit:

$$0 \stackrel{v_L = -v_R}{=} -a_{TL} \cdot \underbrace{v_L \cdot |v_L|}_{=\left(\frac{Q_{ABS}}{2 \cdot A_T}\right)^2} - a_{TR} \cdot \underbrace{v_R \cdot |v_R|}_{=-\left(\frac{Q_{ABS}}{2 \cdot A_T}\right)^2} + b_T \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}}_{n_{SV\_sym}} \quad 2-201$$

Für die benötigte Anzahl Strahlventilatoren für eine symmetrische Strömung gilt somit:

$$n_{SV\_sym} \stackrel{v_L = -v_R}{=} \frac{a_{TL} - a_{TR}}{b_T} \cdot \left(\frac{Q_{ABS}}{2 \cdot A_T}\right)^2 \quad 2-202$$

### 3 Näherungsmodelle des Tunnels mit Längslüftung

Da die quadratische Differentialgleichung des Tunnels kombiniert mit der Differentialgleichung der Strahlventilatoren analytisch kaum zu lösen ist, werden lineare Modelle des Tunnels ermittelt, welche das quadratische Modell möglichst gut beschreiben.

Aus dem nichtlinearen Modell des Tunnels mit Längslüftung (LL) soll ein lineares Modell erzeugt werden.

#### 3.1 Linearisiertes Modell des Tunnels mit Längslüftung

Der Druckverlust durch Reibung ist quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

$$\Delta p_{\text{Geometrie+Fz}} = -\frac{1}{2} \rho \cdot \left( \kappa_{\text{PL}} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}} + \kappa_{\text{PR}} + \frac{n_{\text{Fz}} c_w A_{\text{Fz}}}{A_{\text{T}}} \right) \cdot v \cdot |v| \quad 3-1$$

Für die Linearisierung an der Stelle  $x_{\text{Lin}}$  und Verschiebung der erhaltenen Gerade auf den Nullpunkt gilt (siehe Anhang III.2):

$$y(x) = x \cdot |x| \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung} \\ \text{und Verschiebung} \\ \text{in den Nullpunkt}}}{\approx} 2 \cdot |x_{\text{Lin}}| \cdot x \quad 3-2$$

Daraus ergibt sich für den linearisierten Druckverlust ( $\Delta p_{\text{Geometrie+Fz}}$ ):

$$\Delta p_{\text{Geometrie+Fz}} \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung} \\ \text{und Verschiebung} \\ \text{in den Nullpunkt}}}{\approx} -\rho \cdot \left( \kappa_{\text{PL}} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{\text{hyd}}} + \kappa_{\text{PR}} + \frac{n_{\text{Fz}} c_w A_{\text{Fz}}}{A_{\text{T}}} \right) \cdot |v_{\text{Lin}}| \cdot v \quad 3-3$$

Mit:

$v_{\text{Lin}}$  Linearisierungsgeschwindigkeit [m/s]

Für die Linearisierung ist die Wahl von  $v_{\text{Lin}}$  entscheidend. Abb. 3.1 zeigt die Funktion des Druckverlusts  $\Delta p_{\text{Geometrie+Fz}}$  am Beispiel des Gotschnatunnels für  $n_{\text{Fz}} = 0$  und verschiedene  $v_{\text{Lin}}$ .

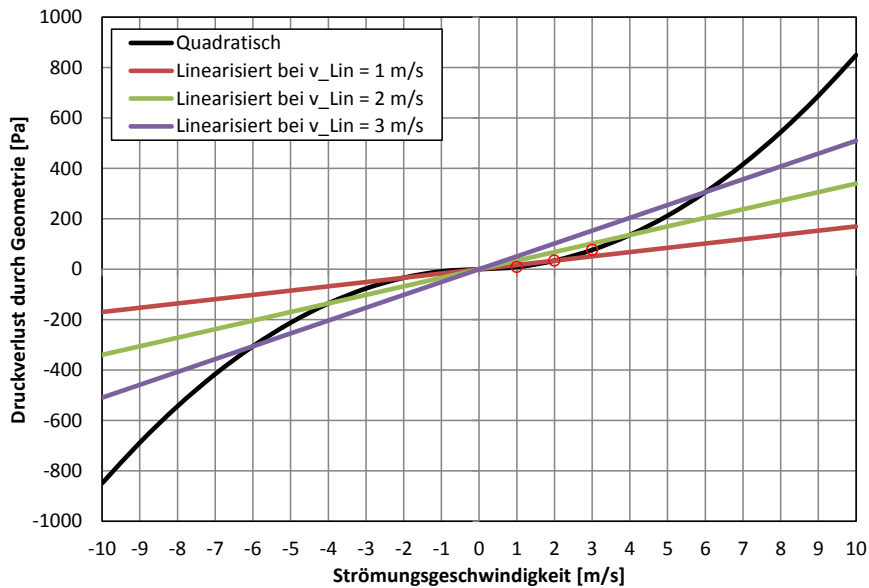


Abb. 3.1 Linearisierung von  $\Delta p_{\text{Geometrie}}$  durch den Nullpunkt für verschiedene  $v_{\text{Lin}}$

Um im Zielbereich eine zuverlässige Regelung zu ermöglichen, wird die Linearisierung für den Soll-Wert der Regelung durchgeführt.

### 3.1.1 Differentialgleichung Linearisiertes Modell des Tunnels LL

Durch die Linearisierung bei  $v_{\text{Lin}}$  ergibt sich somit die Differentialgleichung des linearisierten Modells des Tunnels mit Längslüftung:

$$\frac{dv}{dt} \approx -2 \cdot a_T \cdot |v_{\text{Lin}}| \cdot v + b_T \cdot n_{\text{SV\_ist}} \quad 3-4$$

### 3.1.2 Übertragungsfunktion Linearisiertes Modell des Tunnels LL

Mit der Laplace-Transformation kann das Modell in den Frequenzbereich umgewandelt werden.

Gleichung Tunnel im Frequenzbereich:

$$s \cdot v(s) = -2a_T |v_{\text{Lin}}| \cdot v(s) + b_T \cdot n_{\text{SV\_ist}}(s) \quad 3-5$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion  $G_{\text{Tunnel}}(s)$ :

$$G_{T\_Lin}(s) = \frac{v(s)}{n_{\text{SV\_ist}}(s)} = \frac{b_T}{(s + 2a_T |v_{\text{Lin}}|)} = \frac{b_T}{\frac{2a_T |v_{\text{Lin}}|}{K_{T\_Lin}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\frac{2a_T |v_{\text{Lin}}|}{\tau_{T\_Lin}}} \cdot s + 1 \right)} \quad 3-6$$

Mit:

$K_{T\_Lin}$	Verstärkungsfaktor des Tunnels linearisiertes Modell	[m/s]
$\tau_{T\_Lin}$	Zeitkonstante des Tunnels linearisiertes Modell	[1/s]

Der linearisierte Tunnel ist ein Tiefpass 1. Ordnung. Sowohl die Verstärkung  $K_{T\_Lin}$  als auch die Zeitkonstante  $\tau_{T\_Lin}$  sind abhängig von der Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Lin}}$ .

### 3.1.3 Sprungantwort linearisiertes Modell des Tunnels LL

Für die Sprungantwort des linearisierten Modells des Tunnels LL gilt somit:

$$v(t) = \underbrace{n_{SV\_end} \cdot K_{T\_Lin}}_{v_{end\_Lin}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T\_Lin}}}\right) \quad 3-7$$

Mit:

$$v_{end\_Lin} = n_{SV\_end} \cdot K_{T\_Lin} \quad 3-8$$

$$K_{T\_Lin} = \frac{b_T}{2a_T |v_{Lin}|} \quad 3-9$$

$$\tau_{T\_Lin} = \frac{1}{2a_T |v_{Lin}|} \quad 3-10$$

Abb. 3.2 zeigt die Sprungantwort des Tunnels Gotschna LL - nichtlineares Modell des Tunnels (NLM) und linearisiertes Modell des Tunnels mit  $n_{SV} = 24$ ,  $v_{Lin1} = 1.5$  m/s und  $v_{Lin2} = 3$  m/s.

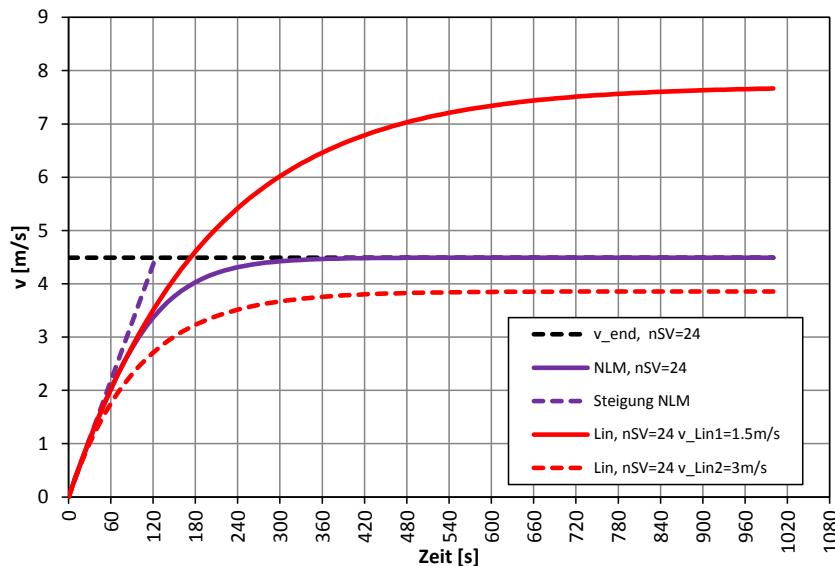


Abb. 3.2 Sprungantwort des Tunnels Gotschna LL - nichtlineares Modell des Tunnels (NLM) und Linearisiertes Modell des Tunnels (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $v_{Lin1} = 1.5$  m/s,  $v_{Lin2} = 3$  m/s)

Die Sprungantworten des linearisierten Modells des Tunnels mit verschiedenen Linearisierungsgeschwindigkeiten  $v_{Lin1} = 1.5$  m/s und  $v_{Lin2} = 3$  m/s zeigt den Einfluss der Linearisierungsgeschwindigkeit auf die Endgeschwindigkeit der Sprungantwort.

### 3.2 Tunnel LL als Tiefpass 1. Ordnung

Das quadratische Modell des Tunnels soll einem Tiefpass 1. Ordnung angenähert werden, unter folgenden Bedingungen:

- Die Sprunganworten des quadratischen Modells und des Tiefpasses 1. Ordnung sollen zu der gleichen stationären Endgeschwindigkeit  $v_{\text{end}}$  führen
- Die Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_T$  soll die gleiche sein.

Für die Endgeschwindigkeit der Sprungantwort soll also gelten:

$$v_{\text{end}} \stackrel{\omega}{\underset{t \rightarrow \infty}{=}} \sqrt{\frac{b_T \cdot n_{SV\_end}}{a_T}} \quad 3-11$$

Für die Zeitkonstante  $\tau_T$  des Tunnels soll gelten:

$$\tau_T = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}}} \quad 3-12$$

#### 3.2.1 Sprungantwort des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Für die Sprungfunktion gilt für das Eingangssignal:

$$n_{SV\_ist}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ n_{SV\_end}, & t > 0 \end{cases} \quad 3-13$$

Für die Sprungantwort eines Tiefpasses 1. Ordnung gilt:

$$v(t) = \underbrace{n_{SV\_end} \cdot K_{T\_PT1}}_{v_{\text{end}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T\_PT1}}}\right) \quad 3-14$$

Für die Endgeschwindigkeit der Sprungantwort gilt also:

$$v_{\text{end}} = n_{SV\_end} \cdot K_{T\_PT1} = \sqrt{\frac{b_T \cdot n_{SV\_end}}{a_T}} \quad 3-15$$

Für die Verstärkung des Tiefpasses 1. Ordnung gilt somit:

$$K_{T\_PT1} = \sqrt{\frac{b_T}{n_{SV\_end} \cdot a_T}} \quad 3-16$$

Für die Zeitkonstante  $\tau_T$  des Tunnels gilt:

$$\tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}}} \quad 3-17$$

Abb. 3.3 zeigt die Sprungantwort des Tunnels Gotschna LL - nichtlineares Modell des Tunnels (NLM) und Tunnel als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) mit  $n_{SV} = 24$ .

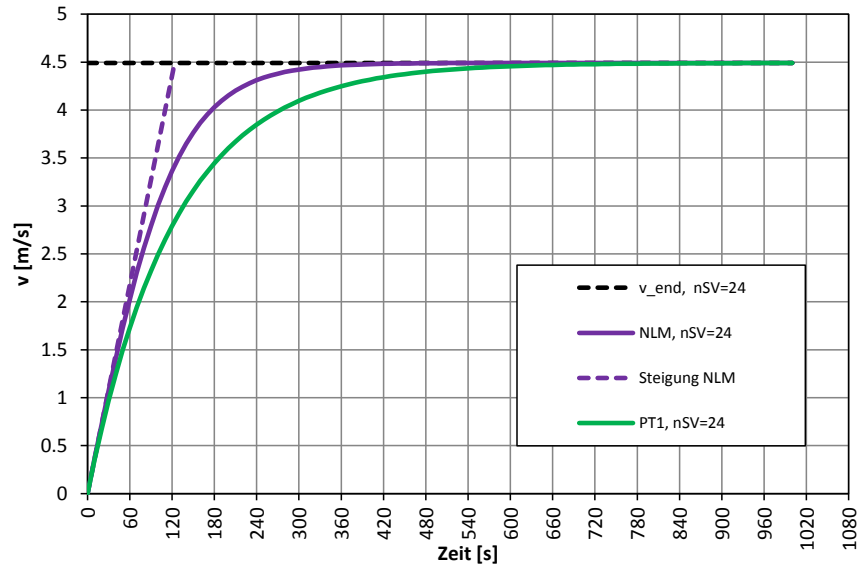


Abb. 3.3 Sprungantwort des Tunnels Gotschna LL - nichtlineares Modell des Tunnels (NLM) und Tunnel als Tiefpass 1. Ordnung (PT1) (mit  $n_{SV} = 24$ )

### 3.2.2 Differentialgleichung des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Abb. 3.4 zeigt das Signalfussbild des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung.

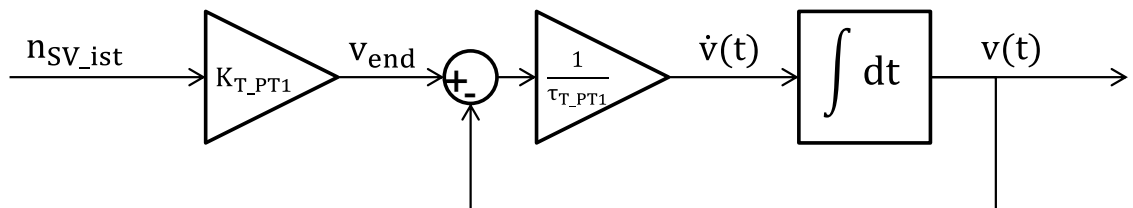


Abb. 3.4 Signalfussbild des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung

Für den Tunnel als Tiefpass 1. Ordnung gilt somit die folgende Differentialgleichung:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{T\_PT1}} \cdot \left( K_{T\_PT1} \cdot n_{SV\_ist}(t) - v(t) \right) = \frac{K_{T\_PT1}}{\tau_{T\_PT1}} \cdot n_{SV\_ist}(t) - \frac{1}{\tau_{T\_PT1}} \cdot v(t) \quad 3-18$$

Im Frequenzbereich ergibt sich:

$$s \cdot v(s) = \frac{K_{T\_PT1}}{\tau_{T\_PT1}} \cdot n_{SV\_ist}(s) - \frac{1}{\tau_{T\_PT1}} \cdot v(s) \quad 3-19$$

Daraus lässt sich die Übertragungsfunktion ableiten.

### 3.2.3 Übertragungsfunktion des Tunnels als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Für die Übertragungsfunktion des Tunnels als Tiefpasses 1. Ordnung gilt somit:

$$G_{T\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_ist}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_{T\_PT1}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{T\_PT1}}\right)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \quad 3-20$$

Mit:

$K_{T\_PT1}$  Verstärkungsfaktor des Tunnelmodells als PT1 [m/s]

$\tau_{T\_PT1}$  Zeitkonstante des Tunnelmodells als PT1 [1/s]

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 3-21$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 3-22$$

## 4 Modelle des Systems LL

Das Modell des Systems Längslüftung ist die Kombination der Modelle Strahlventilator, Tunnel und Strömungsmessung.

Das System Längslüftung hat einen Eingang:

- Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV\_soll}$

Das System Längslüftung hat auch einen Ausgang:

- Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Tunnel

Für die Regelung muss die Strömungsmessung miteinbezogen werden.

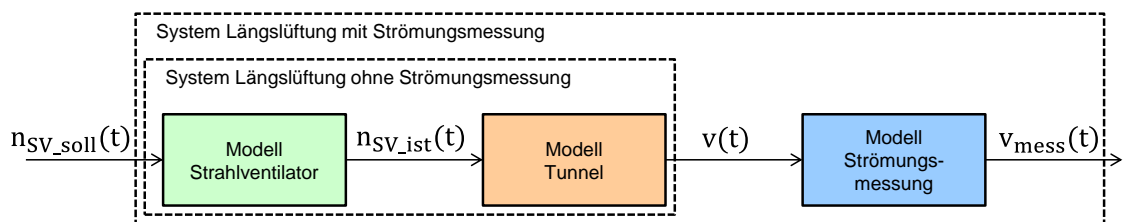


Abb. 4.1 Schema des Systems Längslüftung mit und ohne Strömungsmessung

Für die Strahlventilatoren wurden folgende Modelle hergeleitet:

- Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)
- Strahlventilatoren als Totzeit (TZ)

Für den Tunnel wurden folgende Modelle hergeleitet:

- Nicht-lineares Modell des Tunnels
- Linearisiertes Modell des Tunnels
- Tunnel als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Für die Strömungsmessung wurden folgende Modelle hergeleitet:

- Strömungsmessung als Tiefpass 1. Ordnung (PT1)
- Strömungsmessung als Totzeit (TZ)

Die verschiedenen Modelle der Strahlventilatoren, Tunnel und Strömungsmessung werden jetzt zu verschiedenen Modellen des Systems Längslüftung kombiniert.

Modelle des Systems Längslüftung ohne Messung:

- Nicht-lineares System LL (Nicht-lineares Modell des Tunnels, SV als PT1)
- Nicht-lineares System LL mit Totzeit (Nicht-lineares Modell des Tunnels, SV als Totzeit)
- Linearisiertes System LL (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1)
- System LL als Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1)
- System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV als Totzeit)

Modelle des Systems Längslüftung mit Messung:

- Linearisiertes System LL mit Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV und Messung gemeinsam als PT1)
- System LL mit Messung als Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV und Messung gemeinsam als PT1)
- System LL mit Messung als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV und Messung als Totzeit)
- Linearisiertes System LL mit Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1, Messung als PT1)
- System LL mit Messung als Tiefpass 3. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1, Messung als PT1)

## 4.1 Nicht-lineare Modelle des Systems LL ohne Messung (Tunnel und SV)

Für die Strömungsmessung wird vereinfacht angenommen:

$$v_{\text{mess}}(t) \approx v(t) \quad 4-1$$

### 4.1.1 Nicht-lineares System LL ohne Messung (Tunnel nicht-linear, SV als PT1)

Die Strahlventilatoren werden als Tiefpass 1. Ordnung modelliert. Für den Tunnel wird das nicht-lineare Modell verwendet.

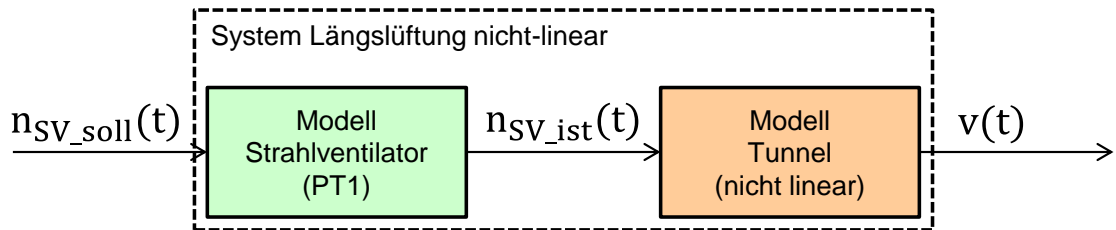


Abb. 4.2 Schema des nicht-linearen Systems Längslüftung

Das nicht-lineare System LL wird durch die quadratische Differentialgleichung des Tunnels und die Differentialgleichung der Strahlventilatoren beschrieben.

Differentialgleichung des Tunnels:

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + \frac{b_T}{v_{SV}} \cdot (v_{SV} - v) \cdot n_{SV\_ist} \quad 4-2$$

Vereinfachte Differentialgleichung des Tunnels (Druckwirkung der SV unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit):

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 4-3$$

Differentialgleichung der Strahlventilatoren:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-4$$

Die Sprungantwort des nicht-linearen Systems LL kann mit einem numerischen Modell des Systems simuliert werden (z.B. RTV oder MATLAB/Simulink). Abb. 4.3 zeigt die Sprungantwort bei 24 aktivierten Strahlventilatoren mit  $\tau_{SV} = 5$  s bzw.  $\tau_{SV} = 60$  s.

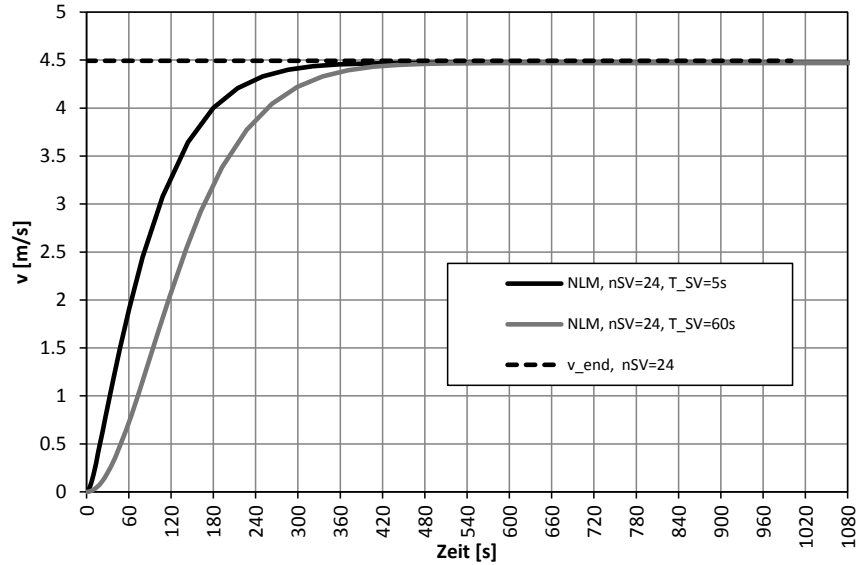


Abb. 4.3 Sprungantworten des Systems Gotschna LL – nicht-lineares Modell (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $T_{SV} = 5$  s bzw.  $T_{SV} = 60$  s)

Die Übertragungsfunktion des nicht-linearen Systems LL kann analytisch nicht hergeleitet werden.

#### 4.1.2 Nicht-lineares System LL mit Totzeit ohne Messung (Nicht-lineares Modell des Tunnels, SV als Totzeit)

Die Strahlventilatoren werden als Totzeit modelliert. Für den Tunnel wird das nicht-lineare Modell verwendet.

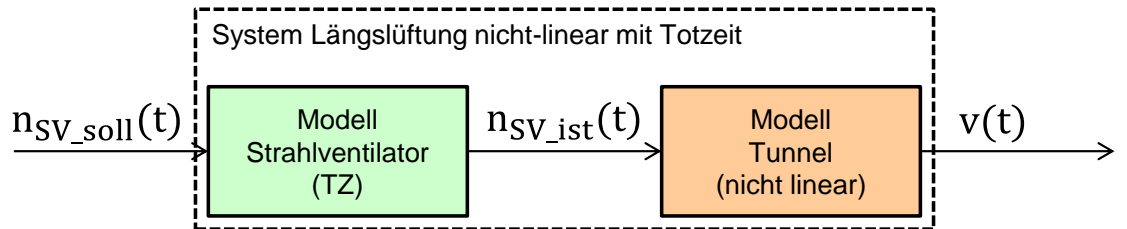


Abb. 4.4 Schema des nicht-linearen Systems Längslüftung mit Totzeit

Das nicht-lineare System LL mit Totzeit wird durch die quadratische Differentialgleichung des Tunnels und die Gleichung der Strahlventilatoren mit Totzeit beschrieben.

Differentialgleichung des Tunnels:

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + \frac{b_T}{V_{SV}} \cdot (v_{SV} - v) \cdot n_{SV\_ist} \tag{4-5}$$

Vereinfachte Differentialgleichung des Tunnels (Druckwirkung der SV unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit):

$$\frac{dv}{dt} = -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV\_ist} \tag{4-6}$$

Gleichung der Strahlventilatoren als Totzeit:

$$n_{SV\_ist}(t) = n_{SV\_soll}(t - T_{SV\_TZ}) \quad 4-7$$

Die Sprungantwort des nicht-linearen Modells des Tunnels wurde in Kapitel 2.5.4 hergeleitet:

$$v(t) = \sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}} \cdot \tanh(\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot t) \quad 4-8$$

Wird die Verzögerung der Strahlventilatoren als Totzeit  $T_{SV\_TZ}$  modelliert ergibt sich für die Sprungantwort:

$$v(t) = \underbrace{\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}}_{v_{end}} \cdot \tanh\left(\underbrace{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}_{\frac{1}{\tau_T}} \cdot \left(t - \underbrace{T_{SV\_TZ}}_{\tau_{SV}}\right)\right) \quad 4-9$$

Mit:

$$v_{end} = \sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}} \quad 4-10$$

$$\tau_T = \frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}} \quad 4-11$$

$$T_{SV\_TZ} = \tau_{SV} \quad 4-12$$

Anstatt der vereinfachten Endgeschwindigkeit kann auch die exakte Endgeschwindigkeit eingesetzt werden:

$$v_{end} = -\frac{b_T \cdot n_{SV}}{2 \cdot a_T \cdot v_{SV}} + \sqrt{\left(\frac{b_T \cdot n_{SV}}{2 \cdot a_T \cdot v_{SV}}\right)^2 + \frac{b_T \cdot n_{SV}}{a_T}} \quad 4-13$$

Abb. 4.5 zeigt die numerisch berechnete Sprungantwort des nicht-linearen Systems verglichen mit der Sprungantwort des nicht-linearen Systems mit Totzeit (Tangenshyperbolicus mit Totzeit).

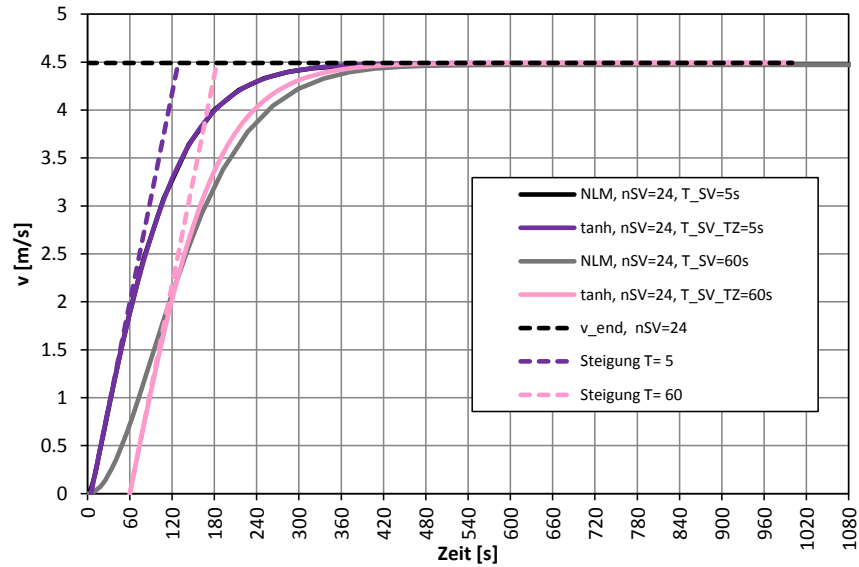


Abb. 4.5 Sprungantworten des Systems Gotschna LL – nicht-lineares Modell und nicht-lineares Modell mit Totzeit ( $n_{SV} = 24$ ,  $T_{SV\_TZ} = 5$  s bzw.  $T_{SV\_TZ} = 60$  s)

Bei  $T_{SV\_TZ} = 5$  s stimmen die beiden Kurven beinahe perfekt überein.

Bei  $T_{SV\_TZ} = 60$  s zeigen die beiden Kurven leichte Unterschiede.

Das nicht-lineare System mit Totzeit (Tangenshyperbolicus mit Totzeit) ist eine sehr gute Näherung des nicht-linearen Systems. Ein grosses Problem ist jedoch die Herleitung der Übertragungsfunktion.

## 4.2 Lineare Modelle des Systems LL ohne Messung (Tunnel und SV)

Für die Messung wird vereinfacht angenommen:

$$v_{\text{mess}}(t) \approx v(t) \quad 4-14$$

### 4.2.1 Linearisiertes System LL ohne Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1)

Die Strahlventilatoren werden als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

Für den Tunnel wird das linearisierte Modell des Tunnels verwendet.

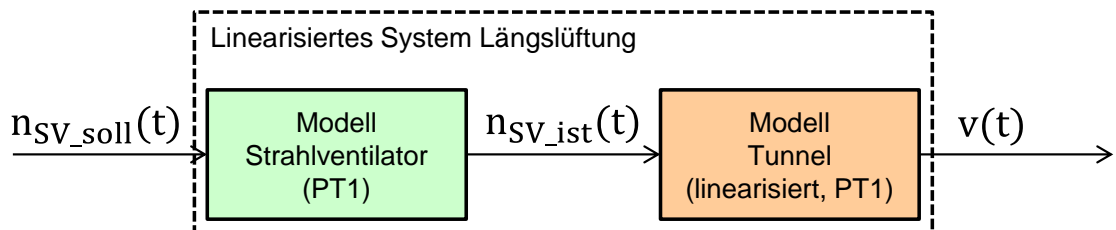


Abb. 4.6 Schema des linearisierten Systems Längslüftung

Die Differentialgleichung des linearisierten Modells des Tunnels LL wurde in Kapitel 3.1.1 hergeleitet:

$$\frac{dv}{dt} \approx -2 \cdot a_T \cdot |v_{\text{Lin}}| \cdot v + b_T \cdot n_{\text{SV}_\text{ist}} \quad 4-15$$

Die Differentialgleichung der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung wurde in Kapitel 2.2.1 definiert:

$$\frac{dn_{\text{SV}_\text{ist}}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{SV}}} \cdot (n_{\text{SV}_\text{soll}} - n_{\text{SV}_\text{ist}}) \quad 4-16$$

Mit der Laplace-Transformation kann das Modell in den Frequenzbereich umgewandelt werden.

Gleichung Tunnel im Frequenzbereich:

$$s \cdot v(s) = -2a_T |v_{\text{Lin}}| \cdot v(s) + b_T \cdot n_{\text{SV}_\text{ist}}(s) \quad 4-17$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion des linearisierten Modells des Tunnels  $G_{\text{T}_\text{Lin}}(s)$ :

$$G_{\text{T}_\text{Lin}}(s) = \frac{v(s)}{n_{\text{SV}_\text{ist}}(s)} = \frac{b_T}{(s + 2a_T |v_{\text{Lin}}|)} = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T |v_{\text{Lin}}|}_{K_{\text{T}_\text{Lin}}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{2a_T |v_{\text{Lin}}|}_{\tau_{\text{T}_\text{Lin}}}} \cdot s + 1 \right)} \quad 4-18$$

Der linearisierte Tunnel ist ein Tiefpass 1. Ordnung. Sowohl die Verstärkung  $K_{\text{T}_\text{Lin}}$  als auch die Zeitkonstante  $\tau_{\text{T}_\text{Lin}}$  sind abhängig von der Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Lin}}$ .

Übertragungsfunktion der Strahlventilatoren  $G_{\text{SV}_\text{PT1}}(s)$ :

$$G_{SV,PT1}(s) = \frac{n_{SV,ist}(s)}{n_{SV,soll}(s)} = \frac{1}{(\tau_{SV} \cdot s + 1)} = \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{SV}}\right)} \quad 4-19$$

Das Produkt der Übertragungsfunktionen SV und Tunnel ergibt die Übertragungsfunktion  $G_{S_{LL, Lin}}(s)$  des linearisierten Systems LL:

$$G_{S_{LL, Lin}}(s) = G_{T, Lin}(s) \cdot G_{SV}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV,soll}(s)}$$

$$G_{S_{LL, Lin}}(s) = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{K_{T, Lin}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{\tau_{T, Lin}}} \cdot s + 1\right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 4-20$$

Das linearisierte System LL ist ein Tiefpass 2. Ordnung. Sowohl die Verstärkung  $K_{T, Lin}$  als auch die Zeitkonstante  $T_{T, Lin}$  sind abhängig von der Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{Lin}$ .

Die Übertragungsfunktion eines überkritisch gedämpften Tiefpasses 2. Ordnung ist definiert als:

$$G_{PT2}(s) = K \cdot \frac{1}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)} \quad 4-21$$

Die Übertragungsfunktion des linearisierten Systems LL:

$$G_{S_{LL, Lin}}(s) = \frac{v_{mess}(s)}{n_{SV,soll}(s)} = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{K_{T, Lin}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{\tau_{T, Lin}}} \cdot s + 1\right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 4-22$$

Mit:

$$K = K_{T, Lin} = \frac{b_T}{2a_T|v_{Lin}|} \quad 4-23$$

$$T_1 = \tau_{T, Lin} = \frac{1}{2a_T|v_{Lin}|} \quad 4-24$$

$$T_2 = \tau_{SV} \quad 4-25$$

Für die Sprungfunktion des Eingangssignals gilt:

$$n_{SV,soll} = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ n_{SV}, & t > 0 \end{cases} \quad 4-26$$

Für die Sprungantwort ergibt sich:

$$v(t) = \underbrace{\frac{n_{SV, end} \cdot K_{T, Lin}}{v_{end}}}_{v_{end}} - \frac{n_{SV} \cdot K_{T, Lin}}{\tau_{T, Lin} - \tau_{SV}} \cdot \left( \tau_{T, Lin} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{T, Lin}}} - \tau_{SV} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{SV}}} \right) \quad 4-27$$

Abb. 4.7 bzw. Abb. 4.8 zeigen die numerisch berechnete Sprungantwort des nicht-linearen Systems, verglichen mit der Sprungantwort des linearisierten Systems mit den Linearisierungsgeschwindigkeiten  $v_{Lin}=1.5$  m/s bzw.  $v_{Lin}=3$  m/s.

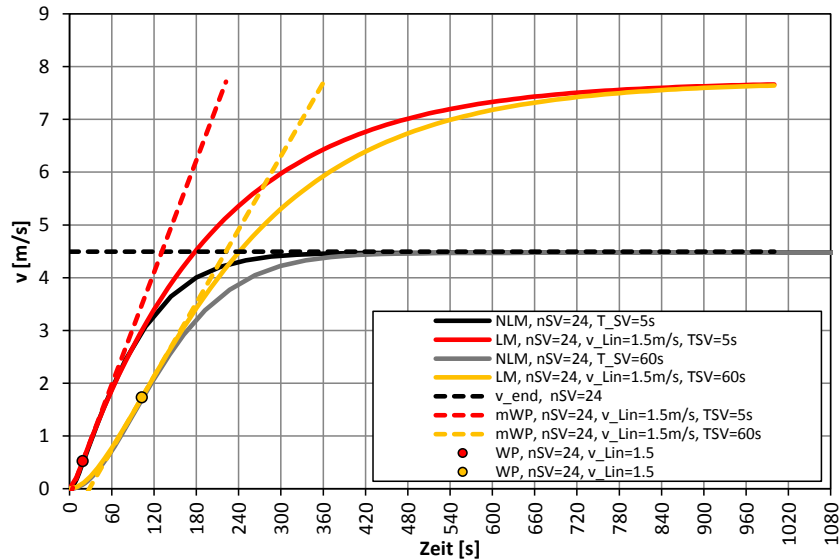


Abb. 4.7 Sprungantworten des Systems Gotschna LL - nichtlineares Modell und linearisiertes Modell (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $v_{Lin} = 1.5 \text{ m/s}$ ,  $T_{SV} = 5 \text{ s}$  bzw.  $T_{SV} = 60 \text{ s}$ )

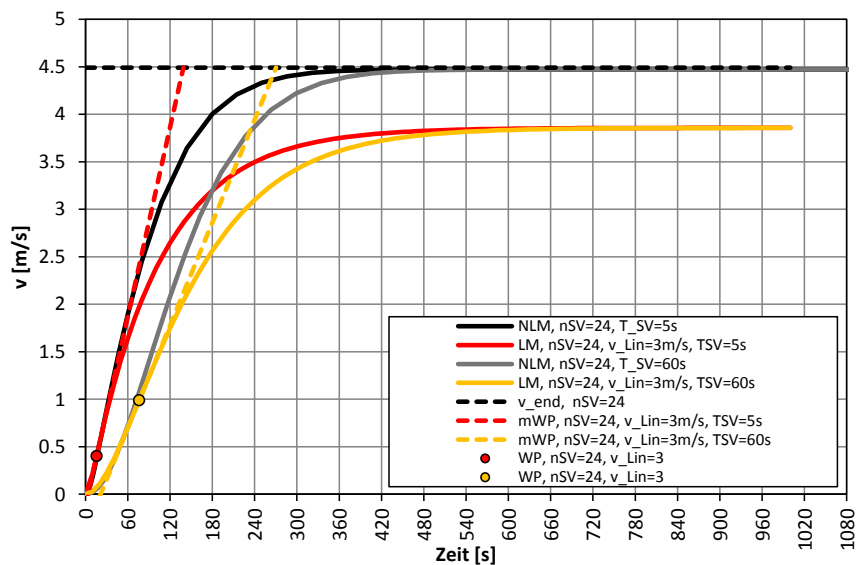


Abb. 4.8 Sprungantworten des Systems Gotschna LL - nichtlineares Modell und linearisiertes Modell (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $v_{Lin} = 3 \text{ m/s}$ ,  $T_{SV} = 5 \text{ s}$  bzw.  $T_{SV} = 60 \text{ s}$ )

Sowohl bei  $\tau_{SV} = 5 \text{ s}$  als auch bei  $\tau_{SV} = 60 \text{ s}$  liegen die beiden Kurven zu Beginn gut übereinander. Bei der Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{Lin} = 1.5 \text{ m/s}$  schiessen jedoch beide Kurven über die Endgeschwindigkeit hinaus bzw. bei  $v_{Lin} = 3 \text{ m/s}$  erreichen sie diese nicht.

Das linearisierte System ist eine nur begrenzt gute Näherung zum nicht-linearen Modell und hängt sehr stark von der gewählten Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{Lin}$  ab.

### 4.2.2 System LL als Tiefpass 2. Ordnung ohne Messung (Tunnel als PT1, SV als PT1)

Sowohl das Modell Strahlventilator als auch das Modell Tunnel werden je als ein Tiefpass 1. Ordnung modelliert. In Serie geschaltet ergibt sich ein Tiefpass 2. Ordnung.

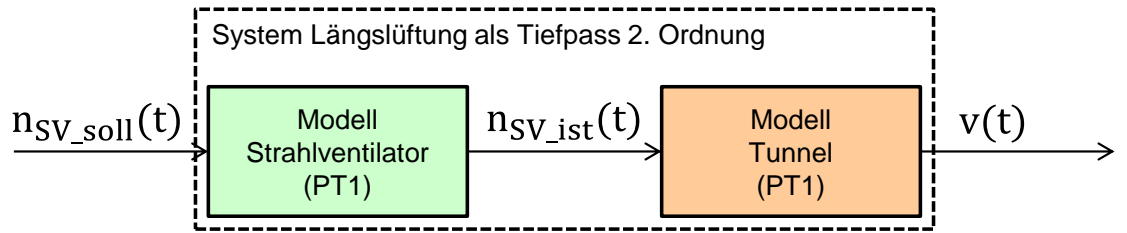


Abb. 4.9 Schema des Systems Längslüftung als Tiefpass 2. Ordnung

Abb. 4.10 zeigt das System LL als Tiefpass 2. Ordnung im Signalflussbild.

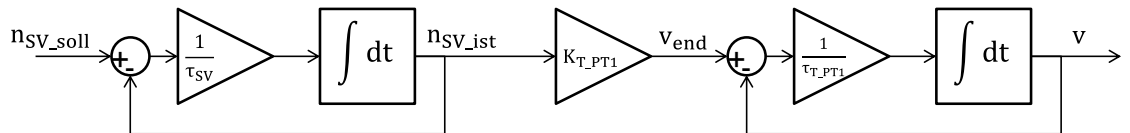


Abb. 4.10 Signalflussbild des Systems LL als Tiefpass 2. Ordnung

Für die Übertragungsfunktion des Tunnels als Tiefpasses 1. Ordnung gilt:

$$G_{T\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_ist}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{T\_PT1}}\right)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \quad 4-28$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-29$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-30$$

Übertragungsfunktion der Strahlventilatoren  $G_{SV\_PT1}(s)$ :

$$G_{SV\_PT1}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{1}{(\tau_{SV} \cdot s + 1)} = \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{SV}}\right)} \quad 4-31$$

Das Produkt der Übertragungsfunktionen SV und Tunnel ergibt die Übertragungsfunktion  $G_{S\_LL\_PT2}(s)$  des Systems LL als Tiefpass 2. Ordnung:

$$G_{S\_LL\_PT2}(s) = G_{T\_PT1}(s) \cdot G_{SV\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = K_{T\_PT1} \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 4-32$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{\text{end}}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-33$$

$$\tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-34$$

Für die Übertragungsfunktion des Systems LL als PT2 gilt somit:

$$G_{S\_LL\_PT2}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \underbrace{\sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}}}_{K_{T\_PT1}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}}_{\tau_{T\_PT1}}} \cdot s + 1 \right) (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 4-35$$

Sowohl die Verstärkung  $K_{T\_PT1}$  als auch die Zeitkonstante  $\tau_{T\_PT1}$  sind abhängig von der Anzahl Strahlventilatoren  $n_{SV\_end}$ .

Die Differentialgleichung des Tunnels wird aus der Übertragungsfunktion abgeleitet:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 4-36$$

Die Differentialgleichung des Strahlventilators ist:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-37$$

Die Übertragungsfunktion eines überkritisch gedämpften Tiefpasses 2. Ordnung:

$$G_{PT2}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)} \quad 4-38$$

Folgende Konstanten werden verwendet:

Es gilt:

$$v_{\text{end}} \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} \sqrt{\frac{b_T \cdot n_{SV\_end}}{a_T}} \quad 4-39$$

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{\text{end}}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-40$$

$$T_1 = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-41$$

$$T_2 = \tau_{SV} \quad 4-42$$

Für die Sprungantwort ergibt sich:

$$v(t) = \underbrace{\frac{v_{\text{end}}}{n_{SV\_end}}}_{v_{\text{end}}} \cdot K_{T\_PT1} - \frac{\overbrace{n_{SV\_end} \cdot K_{T\_PT1}}^{v_{\text{end}}}}{\tau_{T\_PT1} - \tau_{SV}} \cdot \left( \tau_{T\_PT1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{T\_PT1}}} - \tau_{SV} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{SV}}} \right) \quad 4-43$$

Abb. 4.11 zeigt die numerisch berechnete Sprungantwort des nicht-linearen Systems, verglichen mit der Sprungantwort des Tiefpasses 2. Ordnung.

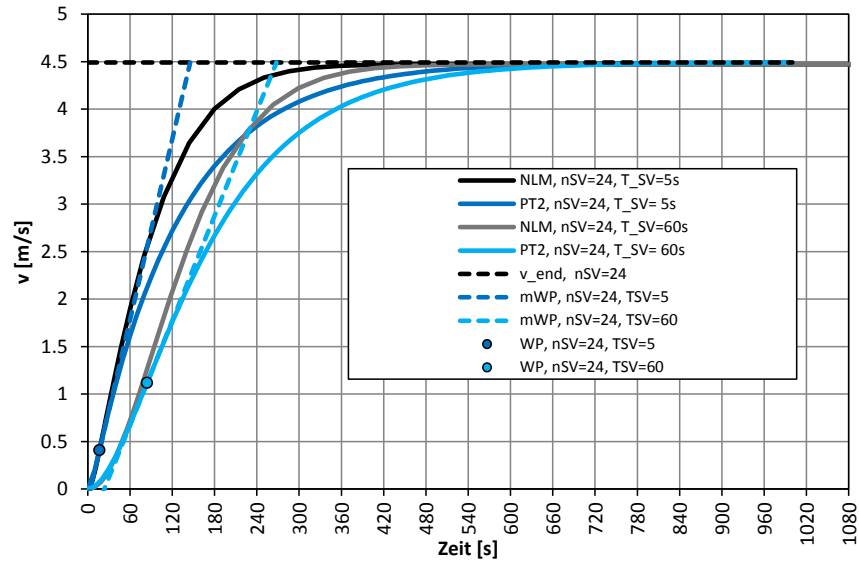


Abb. 4.11 Sprungantworten des Systems Gotschna LL – nicht-lineares Modell und System LL als Tiefpass 2. Ordnung (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $\tau_{SV} = 5$  s bzw.  $\tau_{SV} = 60$  s)

Sowohl bei  $\tau_{SV} = 5$  s als auch bei  $\tau_{SV} = 60$  s liegen die beiden Kurven gut übereinander, wobei der Tiefpass 2. Ordnung ein wenig langsamer reagiert als das nicht-lineare System.

Der Tiefpass 2. Ordnung ist eine gute Näherung zum nicht-linearen Modell.

### 4.2.3 System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit ohne Messung (Tunnel als PT1, SV als Totzeit)

Die Strahlventilatoren werden als Totzeit modelliert.  
Der Tunnel wird als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

In Serie geschaltet ergibt sich dann ein Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit.

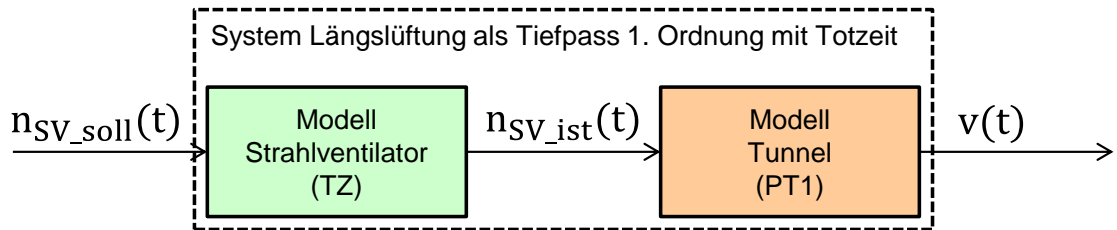


Abb. 4.12 Schema des Systems Längslüftung als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit

Abb. 4.13 zeigt das System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit im Signalflussbild.

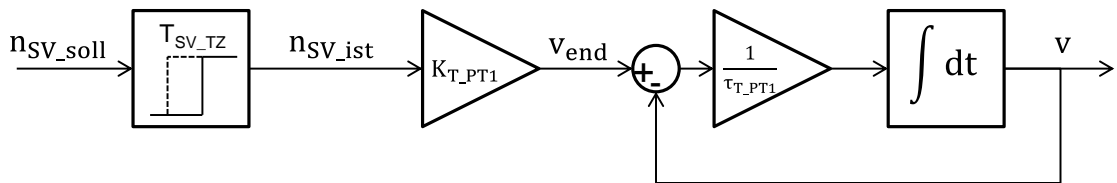


Abb. 4.13 Signalflussbild des Systems LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit

Für die Übertragungsfunktion des Tunnels als Tiefpasses 1. Ordnung gilt:

$$G_{T\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_ist}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{T\_PT1}}\right)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \quad 4-44$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-45$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-46$$

Für die Übertragungsfunktion der Strahlventilatoren als Totzeit  $G_{SV\_TZ}(s)$  gilt:

$$G_{SV\_TZ}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 4-47$$

Das Produkt der Übertragungsfunktionen SV und Tunnel ergibt die Übertragungsfunktion  $G_{S\_LL\_PT1TZ}(s)$  des Systems LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit:

$$G_{S\_PT1TZ}(s) = G_{SV\_TZ}(s) \cdot G_{T\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 4-48$$

Mit:

$$v_{\text{end}} \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} \sqrt{\frac{b_T \cdot n_{SV\_end}}{a_T}} \tag{4-49}$$

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{\text{end}}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \tag{4-50}$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \tag{4-51}$$

$$T_{TZ} = T_{SV\_TZ} \tag{4-52}$$

Die Übertragungsfunktion des Systems LL als Tiefpasses 1. Ordnung mit Totzeit wird zu:

$$G_{\text{Sys\_PT1TZ}}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \underbrace{\sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}}}_{K_{T\_PT1}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}}_{\tau_{T\_PT1}}} \cdot s + 1 \right)} \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \tag{4-53}$$

Für die Sprungantwort gilt:

$$v(t) = \underbrace{n_{SV\_end} \cdot K_{T\_PT1}}_{v_{\text{end}}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{\tau_{T\_PT1}}(t - T_{SV\_TZ})} \right) \tag{4-54}$$

Abb. 4.14 zeigt die numerisch berechnete Sprungantwort des nicht-linearen Systems LL, verglichen mit der Sprungantwort des Systems LL als Tiefpasses 1. Ordnung mit Totzeit.

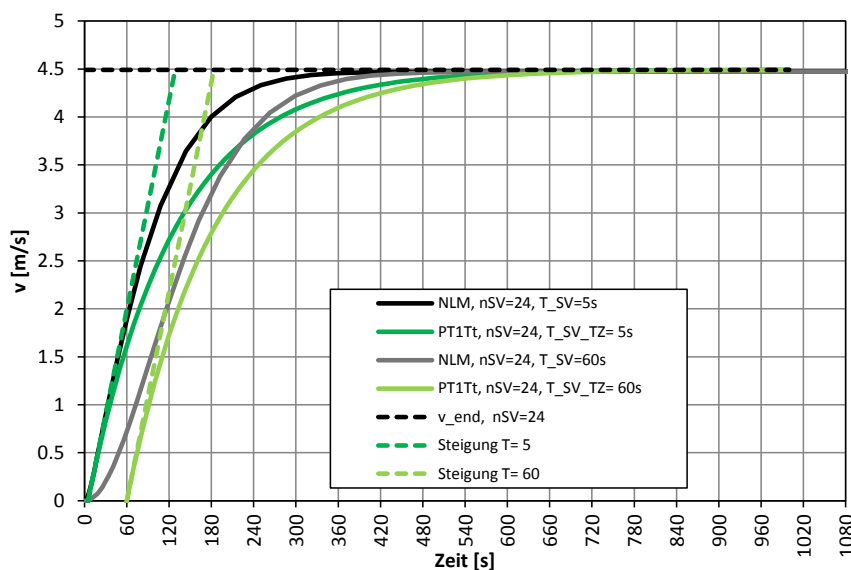


Abb. 4.14 Sprungantworten des Systems Gotschna LL – nicht-lineares System LL und System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $T_{SV\_TZ} = 5$  s bzw.  $T_{SV\_TZ} = 60$  s)

Bei  $T_{SV\_TZ} = 5$  s liegen die beiden Kurven gut übereinander, wobei der Tiefpass ein wenig langsamer reagiert.

Bei  $T_{SV\_TZ} = 60$  s zeigen die beiden Kurven leichte Unterschiede. Der Tiefpass mit Totzeit hinkt hinter der nicht-linearen Kurve hinterher.

Der Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit ist eine gute Näherung zum nicht-linearen Modell.

### 4.3 Lineare Modelle des Systems LL mit Messung (Tunnel, SV und Messung)

Für die MPC-Regelung wird ein lineares Modell des Systems Längslüftung benötigt, welches den Tunnel, die Strahlventilatoren als auch die Strömungsmessung beinhalten soll.

Die Verzögerung der Messung wird also entweder als Tiefpass 1. Ordnung oder als Totzeit modelliert.

#### 4.3.1 Linearisiertes System LL mit Messung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV und Messung gemeinsam als PT1)

Für den Tunnel wird das linearisierte Modell des Tunnels verwendet. Die Verzögerung der Messung wird vereinfacht mit der Verzögerung der Strahlventilatoren kombiniert. Die beiden Tiefpässe Strahlventilatoren und Messung werden näherungsweise gemeinsam als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

Für die Zeitkonstante des Tiefpasses für die Kombination Strahlventilatoren und Messung wird folgendes angenommen:

$$\tau_{SV+M} \approx \tau_{SV} + \tau_M \quad 4-55$$

Mit:

$\tau_{SV+M}$	Zeitkonstante der Kombination Strahlventilator und Messung	[s]
$\tau_{SV}$	Zeitkonstante des Strahlventilators	[s]
$\tau_M$	Zeitkonstante der Messung	[s]

Die Verzögerung der Messung wird dabei in das Modell der Strahlventilatoren integriert.

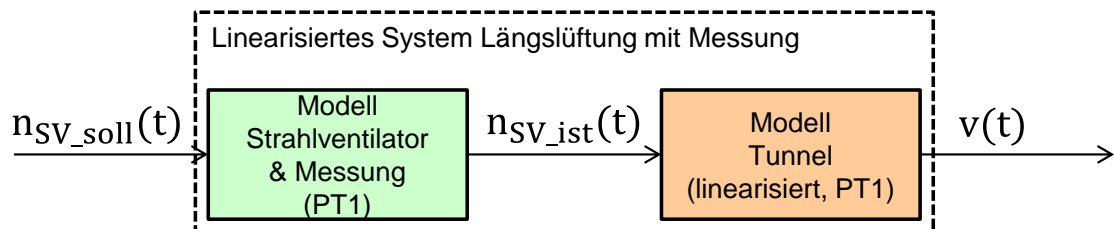


Abb. 4.15 Schema des linearisierten Systems Längslüftung mit Messung

Die Differentialgleichung des linearisierten Modells des Tunnels LL wurde in Kapitel 3.1.1 hergeleitet:

$$\frac{dv}{dt} \approx -2 \cdot a_T \cdot |v_{Lin}| \cdot v + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 4-56$$

Für die Differentialgleichung der Kombination Strahlventilatoren und Messung als Tiefpass 1. Ordnung gilt somit:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV+M}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-57$$

Mit:

$$K_{T\_Lin} = \frac{b_T}{2a_T |v_{Lin}|} \quad 4-58$$

$$\tau_{T\_Lin} = \frac{1}{2a_T |v_{Lin}|} \quad 4-59$$

### 4.3.2 System LL mit Messung als Tiefpass 2. Ordnung (Tunnel als PT1, SV und Messung gemeinsam als PT1)

Das Modell des Tunnels wird als ein Tiefpass 1. Ordnung modelliert. Die Verzögerung der Messung wird vereinfacht mit der Verzögerung der Strahlventilatoren kombiniert. Die beiden Tiefpässe Strahlventilatoren und Messung werden näherungsweise gemeinsam als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

Für die Zeitkonstante des Tiefpasses für die Kombination Strahlventilatoren und Messung wird folgendes angenommen:

$$\tau_{SV+M} \approx \tau_{SV} + \tau_M \quad 4-60$$

Mit:

$\tau_{SV+M}$	Zeitkonstante der Kombination Strahlventilator und Messung	[s]
$\tau_{SV}$	Zeitkonstante des Strahlventilators	[s]
$\tau_M$	Zeitkonstante der Messung	[s]

Die Verzögerung der Messung wird dabei in das Modell der Strahlventilatoren integriert.

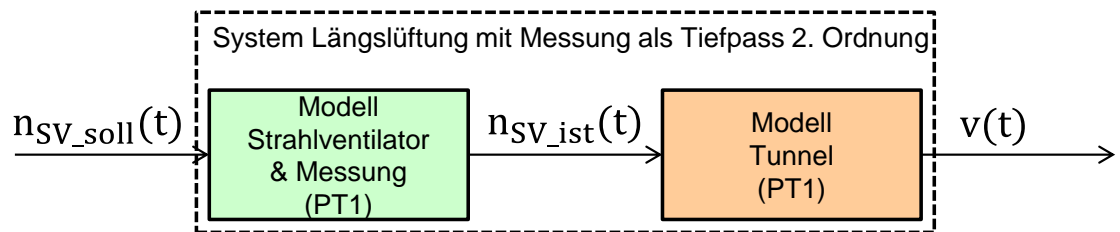


Abb. 4.16 Schema des Systems Längslüftung mit Messung als Tiefpass 2. Ordnung

Für die Differentialgleichung des Tunnels gilt:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 4-61$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-62$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-63$$

Für die Differentialgleichung der Kombination Strahlventilatoren und Messung als Tiefpass 1. Ordnung gilt:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV+M}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-64$$

### 4.3.3 System LL mit Messung als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (Tunnel als PT1, SV und Messung als Totzeit)

Der Tunnel wird als Tiefpass 1. Ordnung modelliert. Die Strahlventilatoren und die Messung werden jeweils als Totzeit modelliert. In Serie geschaltet ergibt sich dann ein Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit.

Für die gesamte Totzeit gilt:

$$T_{TZ_{SV+M}} \approx T_{SV_{TZ}} + T_{M_{TZ}} \quad 4-65$$

Mit:

$$T_{TZ_{SV+M}} \quad \text{Totzeit der Kombination Strahlventilator und Messung} \quad [\text{s}]$$

$$T_{SV_{TZ}} \quad \text{Totzeit der Strahlventilatoren} \quad [\text{s}]$$

$$T_{M_{TZ}} \quad \text{Totzeit der Messung} \quad [\text{s}]$$

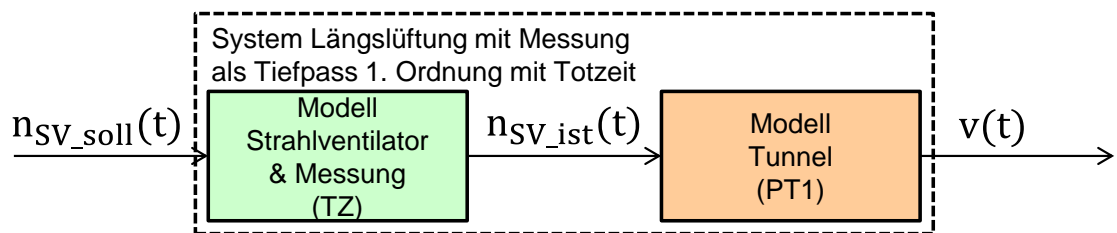


Abb. 4.17 Schema des Systems Längslüftung als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit

Für die Differentialgleichung des Tunnels gilt:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 4-66$$

Mit:

$$K_{T_{PT1}} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-67$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T_{PT1}} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-68$$

Für die Strahlventilatoren als Totzeit gilt:

$$n_{SV\_ist}(t) = n_{SV\_soll}(t - T_{SV_{TZ}}) \quad 4-69$$

Für die Messung als Totzeit gilt:

$$v_{mess}(t) = v(t - T_{mess_{TZ}}) \quad 4-70$$

Für die Kombination aus Strahlventilatoren und Messung als Totzeit gilt:

$$n_{SV\_ist}(t) = n_{SV\_soll}(t - (T_{SV_{TZ}} + T_{M_{TZ}})) \quad 4-71$$

#### 4.3.4 Linearisiertes System LL mit Messung als Tiefpass 3. Ordnung (Linearisiertes Modell des Tunnels, SV als PT1, Messung als PT1)

Die Strahlventilatoren werden als Tiefpass 1. Ordnung modelliert. Für den Tunnel wird das linearisierte Modell des Tunnels verwendet. Die Messung wird als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

In Serie geschaltet ergibt sich dann ein Tiefpass 3. Ordnung.

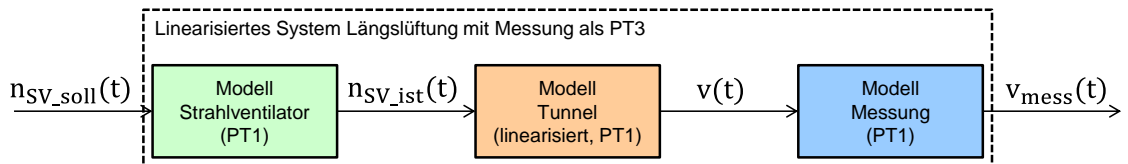


Abb. 4.18 Schema des linearisierten Systems Längslüftung mit Messung als PT3

Die Differentialgleichung des linearisierten Modells des Tunnels LL wurde in Kapitel 3.1.1 hergeleitet:

$$\frac{dv}{dt} \approx -2 \cdot a_T \cdot |v_{Lin}| \cdot v + b_T \cdot n_{SV\_ist} \quad 4-72$$

Die Differentialgleichung der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung wurde in Kapitel 2.2.1 definiert:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-73$$

Die Differentialgleichung der Messung als Tiefpass 1. Ordnung wurde in Kapitel 2.4 definiert:

$$\frac{dv_{mess}}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \cdot (v - v_{mess}) \quad 4-74$$

Mit der Laplace-Transformation kann das Modell in den Frequenzbereich umgewandelt werden.

Gleichung Tunnel im Frequenzbereich:

$$s \cdot v(s) = -2a_T |v_{Lin}| \cdot v(s) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(s) \quad 4-75$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion des linearisierten Modells des Tunnels  $G_{T\_Lin}(s)$ :

$$G_{T\_Lin}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_ist}(s)} = \frac{b_T}{(s + 2a_T |v_{Lin}|)} = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T |v_{Lin}|}_{K_{T\_Lin}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{2a_T |v_{Lin}|}_{\tau_{T\_Lin}}} \cdot s + 1 \right)} \quad 4-76$$

Der linearisierte Tunnel ist ein Tiefpass 1. Ordnung. Sowohl die Verstärkung  $K_{T\_Lin}$  als auch die Zeitkonstante  $\tau_{T\_Lin}$  sind abhängig von der Linearisierungsgeschwindigkeit  $v_{Lin}$ .

Übertragungsfunktion der Strahlventilatoren  $G_{SV\_PT1}(s)$ :

$$G_{SV\_PT1}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{1}{(\tau_{SV} \cdot s + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_{SV}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{SV}}\right)} \quad 4-77$$

Übertragungsfunktion der Messung  $G_{Mess\_PT1}(s)$ :

$$G_{mess\_PT1}(s) = \frac{v_{mess}(s)}{v(s)} = \frac{1}{(s \cdot \tau_M + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_M}}{\left(s + \frac{1}{\tau_M}\right)} \quad 4-78$$

Das Produkt der Übertragungsfunktionen SV, Tunnel und Messung ergibt die Übertragungsfunktion  $G_{S\_LL\_LinPT3}(s)$  des linearisierten Systems LL:

$$G_{S\_LL\_LinPT3}(s) = G_{T\_Lin}(s) \cdot G_{SV}(s) \cdot G_{mess\_PT1}(s) = \frac{v_{mess}(s)}{n_{SV\_soll}(s)}$$

$$G_{S\_LL\_LinPT3}(s) = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{K_{T\_Lin}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{\tau_{T\_Lin}}} \cdot s + 1\right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1) \cdot (\tau_M \cdot s + 1)} \quad 4-79$$

Das linearisierte System LL mit Messung ist ein Tiefpass 3. Ordnung.

Mit:

$$K_{T\_Lin} = \frac{b_T}{2a_T|v_{Lin}|} \quad 4-80$$

$$\tau_{T\_Lin} = \frac{1}{2a_T|v_{Lin}|} \quad 4-81$$

### 4.3.5 System LL mit Messung als Tiefpass 3. Ordnung (Tunnel als PT1, SV als PT1, Messung als PT1)

Die Strahlventilatoren werden als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.  
Der Tunnel wird als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.  
Die Messung wird als Tiefpass 1. Ordnung modelliert.

In Serie geschaltet ergibt sich dann ein Tiefpass 3. Ordnung.

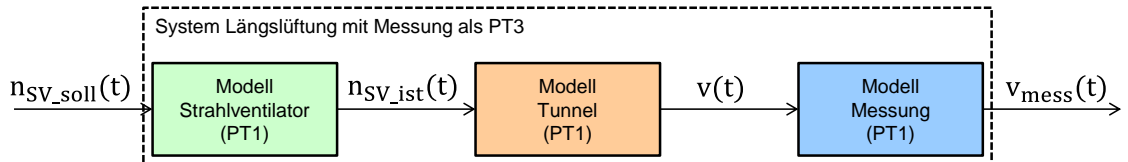


Abb. 4.19 Schema des Systems Längslüftung mit Messung als PT3

Für die Differentialgleichung des Tunnels als PT1 gilt:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV\_end}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 4-82$$

Die Differentialgleichung der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung wurde in Kapitel 2.2.1 definiert:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 4-83$$

Die Differentialgleichung der Messung als Tiefpass 1. Ordnung wurde in Kapitel 2.4 definiert:

$$\frac{dv_{mess}}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \cdot (v - v_{mess}) \quad 4-84$$

Mit der Laplace-Transformation kann das Modell in den Frequenzbereich umgewandelt werden.

Für die Übertragungsfunktion  $G_{T\_PT1}(s)$  des Tunnels als Tiefpasses 1. Ordnung gilt:

$$G_{T\_PT1}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_ist}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_{T\_PT1}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{T\_PT1}}\right)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \quad 4-85$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \frac{v_{end}}{n_{SV\_end}} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-86$$

$$\tau_{PT1} = \tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 4-87$$

Für die Übertragungsfunktion der Strahlventilatoren  $G_{SV\_PT1}(s)$ :

$$G_{SV\_PT1}(s) = \frac{n_{SV\_ist}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{1}{(\tau_{SV} \cdot s + 1)} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{SV}}\right)} \quad 4-88$$

Übertragungsfunktion der Messung  $G_{mess\_PT1}(s)$ :

$$G_{\text{mess\_PT1}}(s) = \frac{v_{\text{mess}}(s)}{v(s)} = \frac{1}{(s \cdot \tau_M + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_M}}{\left(s + \frac{1}{\tau_M}\right)} \quad 4-89$$

Das Produkt der Übertragungsfunktionen SV, Tunnel und Messung ergibt die Übertragungsfunktion  $G_{S\_LL\_PT3}(s)$  des Systems LL als PT3:

$$G_{S\_LL\_PT3}(s) = G_{T\_PT1}(s) \cdot G_{SV\_PT1}(s) \cdot G_{\text{mess\_PT1}}(s) = \frac{v_{\text{mess}}(s)}{n_{SV\_soll}(s)}$$

$$G_{S\_LL\_PT3}(s) = \underbrace{\sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}}}_{K_{T\_PT1}} \cdot \frac{1}{\left( \underbrace{\frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}}}_{\tau_{T\_PT1}} \cdot s + 1 \right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1) \cdot (\tau_M \cdot s + 1)} \quad 4-90$$

### 4.4 Zusammenfassung der Modelle des Systems LL

Tab. 4.1 zeigt die verschiedenen Kombinationen der Modelle aus Strahlventilatoren, Tunnel und Messung.

System-/ Modell-Name	Modell Tunnel	Modell SV	Druckwirkung SV im Tunnel	Modell Messung	$v_{end}$	$\tau_{Tunnel}$	$\tau_{SV}$	$\tau_M$	Übertragungsfunktion $G_{Sys\_LL}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\ soil}(s)}$
<b>NLS</b>	nicht linear	PT1	Nicht vereinfacht	-	$-\frac{b_T n_{SV}}{2a_T v_{SV}} + \sqrt{\left(\frac{b_T n_{SV}}{2a_T v_{SV}}\right)^2 + \frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	-	$\tau_{SV}$	-	-
<b>NLSTZ</b>	nicht linear	Totzeit	vereinfacht	-	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$T_{SV\_TZ} = \tau_{SV}$	-	-
<b>Linearisiertes Modell PT2</b>	linearisiert	PT1	vereinfacht	-	$\frac{b_T n_{SV}}{2a_T  v_{Lin} }$	$\frac{1}{2a_T  v_{Lin} }$	$\tau_{SV}$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)}$
<b>PT2</b>	PT1	PT1	vereinfacht	-	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$\tau_{SV}$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)}$
<b>PT1TZ</b>	PT1	Totzeit	vereinfacht	-	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$T_{SV\_TZ} = \tau_{SV}$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} s + 1)} \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s}$
<b>Linearisiertes Modell PT2 mit Messung</b>	linearisiert	PT1	vereinfacht	Kombination mit SV	$\frac{b_T n_{SV}}{2a_T  v_{Lin} }$	$\frac{1}{2a_T  v_{Lin} }$	$\tau_{SV+M} = \tau_{SV} + \tau_M$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T \cdot s + 1)(\tau_{SV+M} \cdot s + 1)}$
<b>PT2 mit Messung</b>	PT1	PT1	vereinfacht	Kombination mit SV	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$\tau_{SV+M} = \tau_{SV} + \tau_M$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T \cdot s + 1)(\tau_{SV+M} \cdot s + 1)}$
<b>PT1TZ mit Messung</b>	PT1	Totzeit	vereinfacht	Totzeit	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$T_{TZ\_SV+M} = \tau_{SV} + \tau_M$	-	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} s + 1)} \cdot e^{-T_{TZ\_SV+M} \cdot s}$
<b>Linearisiertes Modell PT3 mit Messung</b>	linearisiert	PT1	vereinfacht	PT1	$\frac{b_T n_{SV}}{2a_T  v_{Lin} }$	$\frac{1}{2a_T  v_{Lin} }$	$\tau_{SV}$	$\tau_M$	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T s + 1)(\tau_{SV} s + 1)(\tau_M s + 1)}$
<b>PT3 mit Messung</b>	PT1	PT1	vereinfacht	PT1	$\sqrt{\frac{b_T n_{SV}}{a_T}}$	$\frac{1}{\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}$	$\tau_{SV}$	$\tau_M$	$\frac{v_{end}}{n_{SV}} \cdot \frac{1}{(\tau_T s + 1)(\tau_{SV} s + 1)(\tau_M s + 1)}$

Tab. 4.1 Zusammenfassung der Modelle des Systems LL

Abb. 4.20 und Abb. 4.21 zeigen die Sprungantworten des Systems Gotschna LL mit den verschiedenen Modellen des Systems LL für  $T_{SV} = 5\text{ s}$  und  $T_{SV} = 60\text{ s}$ .

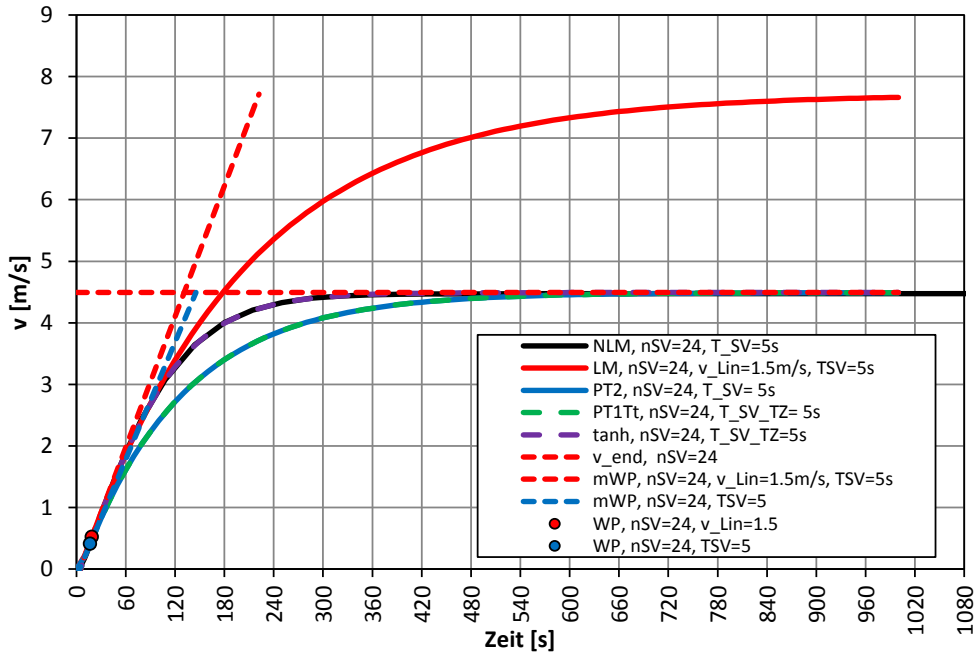


Abb. 4.20 Sprungantworten des Systems Gotschna LL – verschiedene Modelle (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $\tau_{SV} = T_{SV\_TZ} = 5\text{ s}$ )

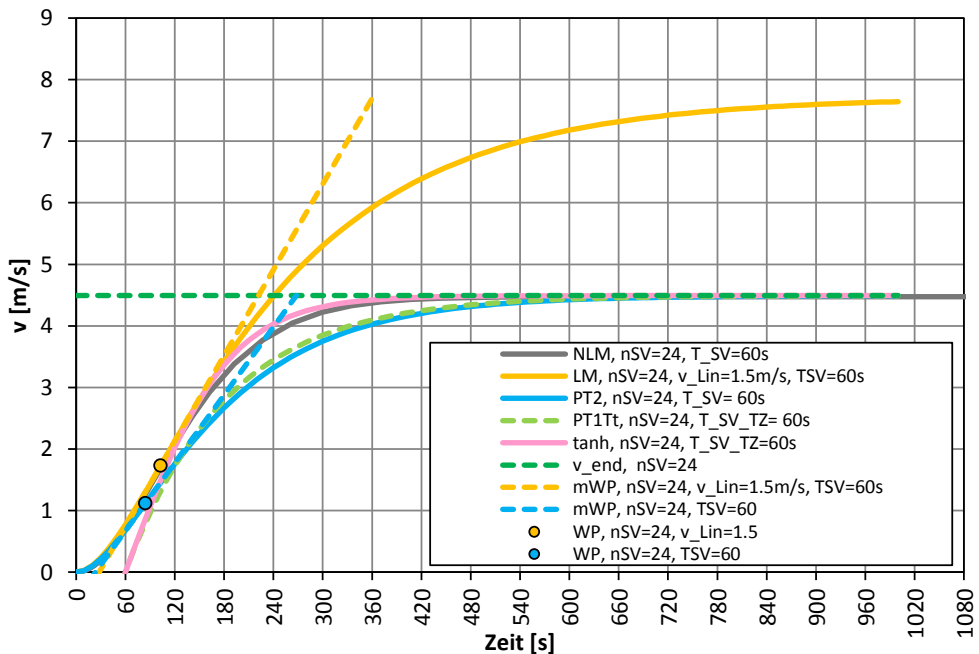


Abb. 4.21 Sprungantworten des Systems Gotschna LL - verschiedene Modelle (mit  $n_{SV} = 24$ ,  $\tau_{SV} = T_{SV\_TZ} = 60\text{ s}$ )

## 5 Analyse des Systems

### 5.1 Pole des Systems LL

Die Pole der Übertragungsfunktion bzw. Übertragungsmatrix legen die Stabilitätseigenschaften des Systems fest. Ein lineares zeitinvariantes System gilt als stabil, wenn alle Pole  $s_i$  des Systems einen negativen Realteil haben:

System asymptotisch stabil, wenn:  $\text{Re}(s_i) < 0$  5-1

System instabil, wenn:  $\begin{cases} \text{Re}(s_i) > 0 \\ s_k = s_l \text{ und } \text{Re}(s_k) = \text{Re}(s_l) = 0 \end{cases}$  5-2

Die Pole sind die Nullstellen des Nenners der Übertragungsfunktion.

#### 5.1.1 Pole linearisiertes System LL

Die Übertragungsfunktion des linearisierten Systems:

$$G_{S_{LL\_Lin}}(s) = \frac{b_T}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{K_{T\_Lin}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{2a_T|v_{Lin}|}_{\tau_{T\_Lin}}} \cdot s + 1 \right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 5-3$$

Durch Umformung ergibt sich:

$$G_{S_{LL\_Lin}}(s) = \frac{b_T}{\tau_{SV}} \cdot \frac{1}{(s + 2a_T|v_{Lin}|) \cdot \left( s + \frac{1}{\tau_{SV}} \right)} \quad 5-4$$

Die Nullstellen des Nenners sind somit:

$$s_1 = -\frac{1}{\tau_{SV}} \quad 5-5$$

$$s_2 = -2a_T|v_0| = -\frac{\kappa_{P1} + \frac{\lambda \cdot L_T}{D_{hyd}} + \kappa_{P2} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T}}{L_T} |v_{Lin}|$$

Das System ist stabil.

#### 5.1.2 Pole System LL PT2

Die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpass 2. Ordnung:

$$G_{S_{PT2}}(s) = \frac{b_T}{\sqrt{\underbrace{a_T \cdot n_{SV\_end}}_{K_{T\_PT1}}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\underbrace{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}}_{\tau_{T\_PT1}}} \cdot s + 1 \right) (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 5-6$$

Durch Umformung ergibt sich:

$$G_{S_{PT2}}(s) = \frac{b_T}{\underbrace{\sqrt{a_T \cdot n_{SV\_end}}}_{K_{T\_PT1}}} \cdot \frac{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}}{\tau_{SV}} \cdot \frac{1}{(s + \sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}) \left( s + \frac{1}{\tau_{SV}} \right)} \quad 5-7$$

Die Nullstellen des Nenners sind somit:

$$s_1 = -\frac{1}{\tau_{SV}} \quad 5-8$$

$$s_2 = -\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}$$

Das System ist stabil.

### 5.1.3 Pole System LL PT1TZ

Die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpasses 1. Ordnung mit Totzeit:

$$G_{S\_PT1TZ}(s) = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)} \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 5-9$$

Mit:

$$K_{T\_PT1} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}} \quad 5-10$$

$$\tau_{T\_PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}} \quad 5-11$$

$$T_{SV\_TZ} = \tau_{SV} \quad 5-12$$

Durch Umformung ergibt sich:

$$G_{S\_PT1TZ}(s) = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{\tau_{T\_PT1}} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_{T\_PT1}}\right)} \cdot e^{-\tau_{SV} \cdot s} \quad 5-13$$

Die Nullstelle des Nenners ist somit:

$$s_1 = -\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}} \quad 5-14$$

Das System ist stabil.

### 5.1.4 Zusammenfassung Pole System LL

Abb. 5.1 zeigt die Pole des Systems mit folgenden Modellen:

- Linearisiertes System
- System als Tiefpass 2. Ordnung
- System als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit

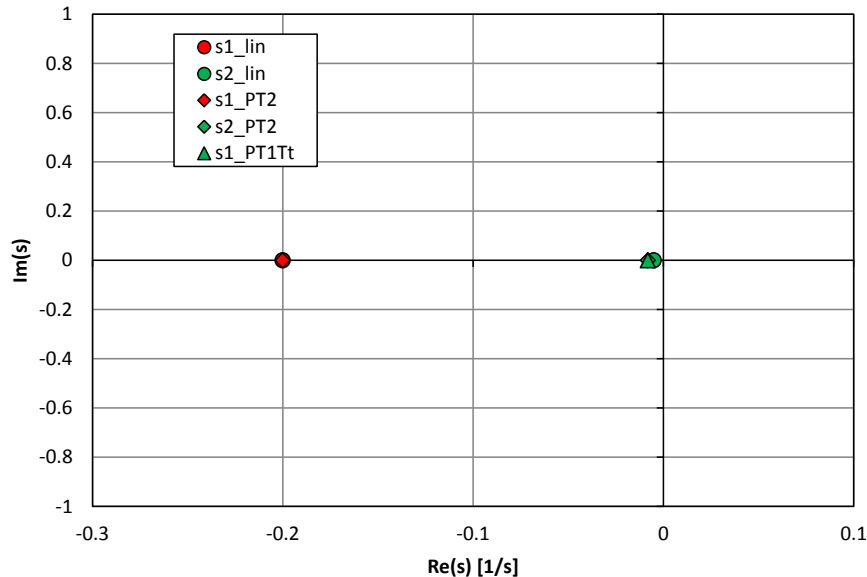


Abb. 5.1 Pole des Systems Gotschna LL als Linearisiertes System (LS), Tiefpass 2. Ordnung (PT2) und Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (PT1TZ) (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $v_{Lin} = 1.5 \text{ m/s}$ ,  $T_{SV} = 5 \text{ s}$ )

Alle Pole  $s_i$  der verschiedenen Näherungsmodelle haben einen negativen Realteil. Alle Systeme sind stabil.

## 5.2 LTI-System LL im Zustandsraummodell

Allgemein lässt sich ein lineares System mit innerem Zustand  $x(t)$ , äußeren Einflüssen  $u(t)$  und Beobachtungen  $y(t)$  darstellen als:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t) = [A] \cdot x(t) + [B] \cdot u(t)$$

5-15

$$y(t) = [C] \cdot x(t) + [D] \cdot u(t)$$

wobei:

- $x(t)$  Innere Zustandsgrößen
- $u(t)$  Eingangsrößen bzw. äussere Einflüsse
- $y(t)$  Beobachtungen

Abb. 5.2 zeigt das System im Signalfussbild.

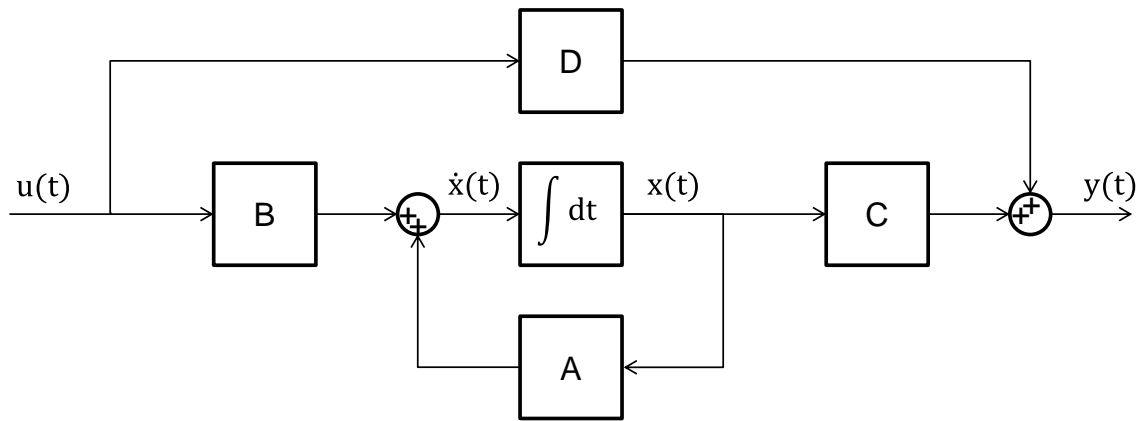


Abb. 5.2 System im Signalflussbild

### 5.2.1 Zustandsraummodell des Linearisierten Systems LL ohne Messung

Das LTI-Modell des linearisierten Systems Längslüftung ohne Messung lässt sich durch 2 Differentialgleichungen beschreiben.

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -2a_T |v_{Lin}| \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 5-16$$

Differentialgleichung Strahlventilatoren:

$$\frac{dn_{SV\_ist}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll}(t) - n_{SV\_ist}(t)) \quad 5-17$$

Für die Ausgangsgrösse (Messung der Strömungsgeschwindigkeit) gilt:

$$v_{mess}(t) = v(t) \quad 5-18$$

Die Gleichungen haben die folgenden zeitabhängigen Variablen:

Variable	Beschreibung	Zuordnung
$v(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x1(t)$
$n_{SV\_ist}(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x2(t)$
$n_{SV\_soll}(t)$	Eingangsgrösse	$u(t)$
$v_{mess}(t)$	Ausgangsgrösse	$y(t)$

Tab. 5.1 Zeitabhängige Variablen des linearisierten Systems ohne Messung

Die zwei Differentialgleichungen werden erweitert:

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{\dot{x}_1(t)} = \underbrace{\frac{-2a_T|v_{Lin}|}{A_{11}}}_{A_{11}} \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{\frac{b_T}{A_{12}}}_{A_{12}} \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_{B_1} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-19$$

Differentialgleichung Strahlventilator:

$$\frac{dn_{SV\_ist}(t)}{\dot{x}_2} = \underbrace{0}_{A_{21}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{\left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{A_{22}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{\left(\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{B_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-20$$

Für die Ausgangsgrösse  $y(t)$  ( $=v_{mess}$ ) gilt:

$$\frac{v_{mess}(t)}{y(t)} = \underbrace{1}_{C_1} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{0}_{C_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_D \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-21$$

Es gelten:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{n}_{SV\_ist}(t) \end{bmatrix}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \\ n_{SV\_ist}(t) \end{bmatrix} \quad 5-22$$

$$u(t) = n_{SV\_soll}(t)$$

$$y(t) = v_{mess}(t)$$

Für die Matrizen des Linearisierten Systems gelten:

$$A_{LS} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-2a_T|v_0|) & (b_T) \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_{SV}}\right) \end{bmatrix} \quad 5-23$$

$$C = [C_1 \quad C_2] = [1 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

## 5.2.2 Zustandsraummodell des Systems LL als PT2

Das LTI-Modell des Systems Längslüftung mit dem Näherungsmodell PT2 lässt sich durch 2 Differentialgleichungen beschreiben.

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t) \quad 5-24$$

Differentialgleichung Strahlventilatoren:

$$\frac{dn_{SV\_ist}}{dt} = \frac{1}{\tau_{SV}} \cdot (n_{SV\_soll} - n_{SV\_ist}) \quad 5-25$$

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit gilt:

$$v_{mess}(t) = v(t) \quad 5-26$$

Die Gleichungen haben die folgenden zeitabhängigen Variablen:

Variable	Beschreibung	Zuordnung
$v(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x_1(t)$
$n_{SV\_ist}(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x_2(t)$
$n_{SV\_soll}(t)$	Eingangsgrösse	$u(t)$
$v_{mess}(t)$	Ausgangsgrösse	$y(t)$

Tab. 5.2 Zeitabhängige Variablen des Systems PT2 ohne Messung

Die drei Gleichungen werden erweitert:

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{\dot{x}_1(t)} = \underbrace{-\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}_{A_{11}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{b_T}_{A_{12}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_{B_1} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-27$$

Differentialgleichung Strahlventilator:

$$\frac{dn_{SV\_ist}(t)}{\dot{x}_2} = \underbrace{0}_{A_{21}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{\left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{A_{22}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{\left(\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{B_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-28$$

Messung der Strömungsgeschwindigkeit:

$$\frac{v_{mess}(t)}{y(t)} = \underbrace{1}_{C_1} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{0}_{C_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_{D} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-29$$

Es gelten:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{n}_{SV\_ist}(t) \end{bmatrix}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \\ n_{SV\_ist}(t) \end{bmatrix} \quad 5-30$$

$$u(t) = n_{SV\_soll}(t)$$

$$y(t) = v_{\text{mess}}(t)$$

Für die Matrizen Des Systems PT2 gilt:

$$A_{\text{PT2}} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\sqrt{a_T b_T n_{\text{SV}}}) & (b_T) \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{\text{SV}}}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_{\text{SV}}}\right) \end{bmatrix} \quad 5-31$$

$$C = [C_1 \quad C_2] = [1 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

### 5.2.3 Zustandsraummodell des Systems LL mit Messung als PT3

Das LTI-Modell des Systems Längslüftung mit dem Näherungsmodell PT3 lässt sich durch 3 Differentialgleichungen beschreiben.

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{\text{SV}}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{\text{SV\_ist}}(t) \quad 5-32$$

Differentialgleichung Strahlventilatoren:

$$\frac{dn_{\text{SV\_ist}}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{SV}}} \cdot (n_{\text{SV\_soll}} - n_{\text{SV\_ist}}) \quad 5-33$$

Differentialgleichung Messung der Strömungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dv_{\text{mess}}}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \cdot (v - v_{\text{mess}}) \quad 5-34$$

Die drei Differentialgleichungen haben die folgenden zeitabhängigen Variablen:

Variable	Beschreibung	Zuordnung
$v(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x1(t)$
$n_{\text{SV\_ist}}(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x2(t)$
$v_{\text{mess}}(t)$	Innere Zustandsgrösse	$x3(t)$
$n_{\text{SV\_soll}}(t)$	Eingangsgrösse	$u(t)$
$v_{\text{mess}}(t)$	Ausgangsgrösse	$y(t)$

Tab. 5.3 Zeitabhängige Variablen des Systems als PT3 mit Messung

Die drei Differentialgleichungen werden erweitert:

Differentialgleichung Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{\dot{x}_1(t)} = \underbrace{-\sqrt{a_T b_T n_{SV}}}_{A_{11}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{b_T}_{A_{12}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_{A_{13}} \cdot \underbrace{v_{mess}(t)}_{x_3(t)} + \underbrace{0}_{B_1} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-35$$

Differentialgleichung Strahlventilator:

$$\frac{dn_{SV\_ist}(t)}{\dot{x}_2} = \underbrace{0}_{A_{21}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{\left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{A_{22}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{0}_{A_{23}} \cdot \underbrace{v_{mess}(t)}_{x_3(t)} + \underbrace{\left(\frac{1}{\tau_{SV}}\right)}_{B_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-36$$

Differentialgleichung Messung der Strömungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dv_{mess}(t)}{\dot{x}_3} = \underbrace{\left(\frac{1}{\tau_M}\right)}_{A_{31}} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{0}_{A_{32}} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{\left(-\frac{1}{\tau_M}\right)}_{A_{33}} \cdot \underbrace{v_{mess}(t)}_{x_3(t)} + \underbrace{0}_{B_3} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-37$$

Für die Ausgangsgrösse  $y(t)$  ( $=v_{mess}$ ) gilt:

$$\frac{v_{mess}(t)}{y(t)} = \underbrace{0}_{C_1} \cdot \underbrace{v(t)}_{x_1(t)} + \underbrace{0}_{C_2} \cdot \underbrace{n_{SV\_ist}(t)}_{x_2(t)} + \underbrace{1}_{C_3} \cdot \underbrace{v_{mess}(t)}_{x_3(t)} + \underbrace{0}_{D} \cdot \underbrace{n_{SV\_soll}(t)}_{u(t)} \quad 5-38$$

Es gelten:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{n}_{SV\_ist}(t) \\ \dot{v}_{mess}(t) \end{bmatrix}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \\ n_{SV\_ist}(t) \\ v_{mess}(t) \end{bmatrix} \quad 5-39$$

$$u(t) = n_{SV\_soll}(t)$$

$$y(t) = v_{mess}(t)$$

Für die Matrizen des Systems PT3 mit Messung gilt:

$$A_{PT3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-\sqrt{a_T b_T n_{SV}}\right) & (b_T) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right) & 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_M}\right) & 0 & \left(-\frac{1}{\tau_M}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_{SV}}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad 5-40$$

$$C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3] = [0 \quad 0 \quad 1]$$

$$D = [0]$$

### 5.2.4 Zustandsraummodell des Systems LL mit Messung als PT1TZ

Das LTI-Modell des Systems Längslüftung mit Messung mit dem Näherungsmodell PT1TZ lässt sich durch die 3 Gleichungen beschreiben.

Impulsgleichung im Tunnel:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\sqrt{a_T b_T n_{SV}} \cdot v(t) + b_T \cdot n_{SV\_ist}(t - \tau_{SV}) \quad 5-41$$

Strahlventilatoren:

$$n_{SV\_ist}(t) = n_{SV\_soll}(t - T_{SV\_TZ}) \quad 5-42$$

Messung der Strömungsgeschwindigkeit:

$$v_{mess}(t) = v(t - T_{mess\_TZ}) \quad 5-43$$

In MATLAB kann ein LTI-System mit Verzögerung (Totzeit) generiert werden.

### 5.3 Stabilität des Systems LL

Die Stabilität eines LTI-Systems kann in drei Typen unterteilt werden:

- Asymptotisch stabil:  
Das System kommt von sich selbst auf einen stabilen Zustand ohne zusätzliche Energie (d.h. Oszillation reduziert sich)
- Grenzstabil:  
Das System bleibt in dem Zustand (d.h. Oszillation bleibt unverändert)
- Instabil:  
Das System braucht Hilfsenergie, um einen stabilen Zustand zu halten (d.h. Oszillation wird grösser)

Die Pole der Jacobi-Matrix (Matrix A für LTI-System) bestimmen diese wichtigen Eigenschaften:

- Asymptotisch stabil: der Realteil aller Eigenwerte ist negativ
- Grenzstabil: der grösste Teil aller Eigenwerte ist null
- Instabil: der Realteil eines Eigenwertes ist positiv

Zusätzlich kann man bestimmen, ob das System oszillieren wird. Wenn der Imaginärteil aller Eigenwerte null ist, wird das System nicht oszillieren. Wenn der Imaginärteil eines Eigenwertes ungleich null ist, ist Oszillation zu erwarten.

#### 5.3.1 Stabilität des Linearisierten Systems und des Systems PT2 ohne Messung

Ausgehend von der Jacobi-Matrix A werden die Eigenwerte ( $s_1, s_2$ ) bestimmt.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \quad 5-44$$

Für die Eigenwerte s muss gelten:

$$\det[A - sI] = 0 \quad 5-45$$

wobei: I = Einheitsmatrix

$$0 = \det[A - sI] = \det \begin{bmatrix} A_{11} - s & A_{12} \\ 0 & A_{22} - s \end{bmatrix} = (A_{11} - s) \cdot (A_{22} - s) \quad 5-46$$

Die Eigenwerte sind dann:

$$s_1 = A_{11} \quad 5-47$$

$$s_2 = A_{22}$$

Für die Matrizen A des Linearisierten Systems und des Systems PT2 gelten:

$$A_{LS} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-2a_T |v_{Lin}|) & (b_T) \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right) \end{bmatrix} \quad 5-48$$

$$A_{PT2} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\sqrt{a_T b_T n_{SV}}) & (b_T) \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right) \end{bmatrix} \quad 5-49$$

Sowohl  $s_1$  als auch  $s_2$  sind für beide Modelle immer real und negativ.

Daraus folgt:

- Das System ist asymptotisch stabil
- Das System wird nicht oszillieren

### 5.3.2 Stabilität des Systems LL mit Messung als PT3

Ausgehend von der Jacobi-Matrix  $A_{PT3}$  werden die Eigenwerte ( $s_1, s_2, s_3$ ) bestimmt.

$$A_{PT3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad 5-50$$

Für die Eigenwerte  $s$  muss gelten:

$$\det[A - sI] = 0 \quad 5-51$$

wobei:  $I$  = Einheitsmatrix

$$0 = \det[A_{PT3} - sI] = \det \begin{bmatrix} A_{11} - s & A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} - s & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} - s \end{bmatrix} = (A_{11} - s)(A_{22} - s)(A_{33} - s) \quad 5-52$$

Die Eigenwerte sind somit:

$$s_1 = A_{11}$$

$$s_2 = A_{22} \quad 5-53$$

$$s_3 = A_{33}$$

Für die Matrize  $A$  des Systems PT3 gilt:

$$A_{PT3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\sqrt{a_T b_T n_{SV}}) & (b_T) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{1}{\tau_{SV}}\right) & 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_M}\right) & 0 & \left(-\frac{1}{\tau_M}\right) \end{bmatrix} \quad 5-54$$

Sowohl  $s_1, s_2$  und  $s_3$  sind real und negativ.

Daraus folgt:

- Das System ist asymptotisch stabil
- Das System wird nicht oszillieren

## 5.4 Beobachtbarkeit des Systems LL

Ein System ist beobachtbar, wenn der Zustand des Systems mit den Messungen des Ausgangssignals bestimmt werden kann. Falls dies der Fall ist, kann man sagen, dass die Anzahl Messungen geeignet sind. Falls diese Eigenschaften nicht erfüllt sind, sollte man entweder die Platzierung der Messung ändern oder weitere Messungen einrichten.

Im Folgenden wird die Beobachtbarkeit eines Systems bestimmt.

Das System ist beschrieben durch das Zustandsraummodell:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t) = [A] \cdot x(t) + [B] \cdot u(t) \quad 5-55$$

$$y(t) = [C] \cdot x(t) + [D] \cdot u(t)$$

System n-ter Ordnung mit den Matrizen:

$$\begin{aligned} & [A]_{n,n} \\ & [B]_{n,m} \\ & [C]_{p,n} \\ & [D]_{p,m} \end{aligned} \quad 5-56$$

Man bildet die Matrix V

$$[V] = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad 5-57$$

Ein System gilt als vollständig beobachtbar, sofern:

$$\text{Rang}[V] = n \quad 5-58$$

Für das System PT2 und das linearisierte System gilt für die Matrizen:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}_{2,2}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}_{2,1} \quad 5-59$$

$$C = [C_1 \ 0]_{1,2}$$

$$D = [0]_{1,1}$$

mit:

$n = 2 \rightarrow$  System 2. Ordnung

$m = 1$

$p = 1$

Man bildet die Matrix V

$$[V] = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{[C_1 \ 0]}^c \\ \underbrace{[C_1 \ 0]}_c \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_1 & 0 \\ C_1 A_{11} & C_1 A_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad 5-60$$

Für den Rang der Matrix V gilt:

$$\text{Rang}[V] = \text{Rang} \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ C_1 A_{11} & C_1 A_{12} \end{bmatrix} = 2 = n \quad 5-61$$

Das System ist vollständig beobachtbar

Für die Matrizen des Systems PT3 mit Messung gilt:

$$A_{PT3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix}_{3,3}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \\ 0 \end{bmatrix}_{3,1} \quad 5-62$$

$$C = [0 \quad 0 \quad C_3]_{1,3}$$

$$D = [0]_{1,1}$$

mit:

$n = 3 \rightarrow$  System 3. Ordnung

$m = 1$

$p = 1$

Es gilt:

$$A_{PT3}^2 = \begin{bmatrix} A_{11}^2 & A_{11}A_{12} + A_{12}A_{22} & 0 \\ 0 & A_{22}^2 & 0 \\ A_{11}A_{31} + A_{31}A_{33} & A_{12}A_{31} & A_{33}^2 \end{bmatrix} \quad 5-63$$

Man bildet die Matrix V

$$[V] = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_3 \\ C_3 A_{31} & 0 & C_3 A_{33} \\ C_3 (A_{11} A_{31} + A_{31} A_{33}) & C_3 A_{12} A_{31} & C_3 A_{33}^2 \end{bmatrix} \quad 5-64$$

Für den Rang der Matrix V gilt:

$$\text{Rang}[V] = 3 = n \quad 5-65$$

Das System ist vollständig beobachtbar

## 5.5 Steuerbarkeit des Systems LL

Ein System ist vollständig steuerbar, wenn es durch einen unbeschränkten Steuervektor in jeden beliebigen Zustand gebracht werden kann. Das Steuerbarkeitskriterium kann genutzt werden um die Regelungsaufgabe zu vereinfachen. Falls eine Störung des Systems nicht steuerbar ist, kann man diesen Teil unterdrücken anstatt zu regeln.

Für die Bestimmung dieser Eigenschaften kann man die folgende Beziehung verwenden (Kalman Kriterium).

Das System ist beschrieben durch das Zustandsraummodell:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t) = [A] \cdot x(t) + [B] \cdot u(t) \quad 5-66$$

$$y(t) = [C] \cdot x(t) + [D] \cdot u(t)$$

System n-ter Ordnung mit den Matrizen:

$$\begin{array}{l} [A]_{n,n} \\ [B]_{n,m} \\ [C]_{p,n} \\ [D]_{p,m} \end{array} \quad 5-67$$

Man bildet die Matrix U

$$[U] = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad 5-68$$

Ein System ist vollständig steuerbar, wenn:

$$\text{Rang}[U] = n \quad 5-69$$

Für das System PT2 und das linearisierte System gilt für die Matrizen:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}_{2,2}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}_{2,1} \quad 5-70$$

$$C = [C_1 \quad 0]_{1,2}$$

$$D = [0]_{1,1}$$

mit:

$n = 2 \rightarrow$  System 2. Ordnung

$m = 1$

$p = 1$

Man bildet die Matrix U

$$[U] = [B \quad AB] = \left[ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}}_B \quad \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}}_B \right] = \begin{bmatrix} 0 & B_2 A_{12} \\ B_2 & B_2 A_{22} \end{bmatrix} \quad 5-71$$

Für den Rang der Matrix U gilt:

$$\text{Rang}[U] = \text{Rang} \begin{bmatrix} 0 & B_2 A_{12} \\ B_2 & B_2 A_{22} \end{bmatrix} = 2 = n \quad 5-72$$

Das System ist vollständig steuerbar

Für die Matrizen des Systems PT3 mit Messung gilt:

$$A_{PT3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix}_{3,3}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \\ 0 \end{bmatrix}_{3,1}$$

5-73

$$C = [0 \quad 0 \quad C_3]_{1,3}$$

$$D = [0]_{1,1}$$

mit:

$n = 3 \rightarrow$  System 3. Ordnung

$m = 1$

$p = 1$

Es gilt:

$$A_{PT3}^2 = \begin{bmatrix} A_{11}^2 & A_{11}A_{12} + A_{12}A_{22} & 0 \\ 0 & A_{22}^2 & 0 \\ A_{11}A_{31} + A_{31}A_{33} & A_{12}A_{31} & A_{33}^2 \end{bmatrix}$$

5-74

Man bildet die Matrix U

$$[U] = [B \quad AB \quad A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & B_2A_{12} & B_2(A_{11}A_{12} + A_{12}A_{22}) \\ B_2 & B_2A_{22} & B_2A_{22}^2 \\ 0 & 0 & B_2A_{12}A_{31} \end{bmatrix}$$

5-75

Für den Rang der Matrix U gilt:

$$\text{Rang}[U] = 3 = n$$

5-76

Das System ist vollständig steuerbar

## 5.6 Frequenzgang des Linearen Systems LL

Der Frequenzgang beschreibt den Zusammenhang zwischen sinusförmigen Schwingungen am Ein- und Ausgang eines linearen zeitinvarianten Systems (LZI-Systems).

Gegenüber der Eingangsschwingung hat die Ausgangsschwingung wegen des linearen Verhaltens des Systems dieselbe Frequenz; veränderlich sind seine Amplitude und seine Phase.

Das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung – je als Funktion der Frequenz  $\omega$  oder Kreisfrequenz  $\omega$  – sind zusammen der Frequenzgang, einzeln der Amplituden-Frequenzgang und der Phasen-Frequenzgang.

Mit  $\sigma=0$  in  $s = \sigma + j\omega$  geht die Übertragungsfunktion in den Frequenzgang über.

### 5.6.1 Bode-Diagramm System LL

Zur anschaulichen Darstellung des Frequenzgangs dient das Bode-Diagramm. In je einem Graph sind der Amplitudengang (in Dezibel) und der Phasengang über die Frequenz (logarithmisch) dargestellt.

Abb. 5.3 zeigt das Bode-Diagramm der Näherungsmodelle des Systems Längslüftung am Beispieltunnel Gotschna:

- Linearisiertes Modell PT2
- Tiefpass 2. Ordnung
- Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit
- Linearisiertes Modell PT3
- Tiefpass 3. Ordnung

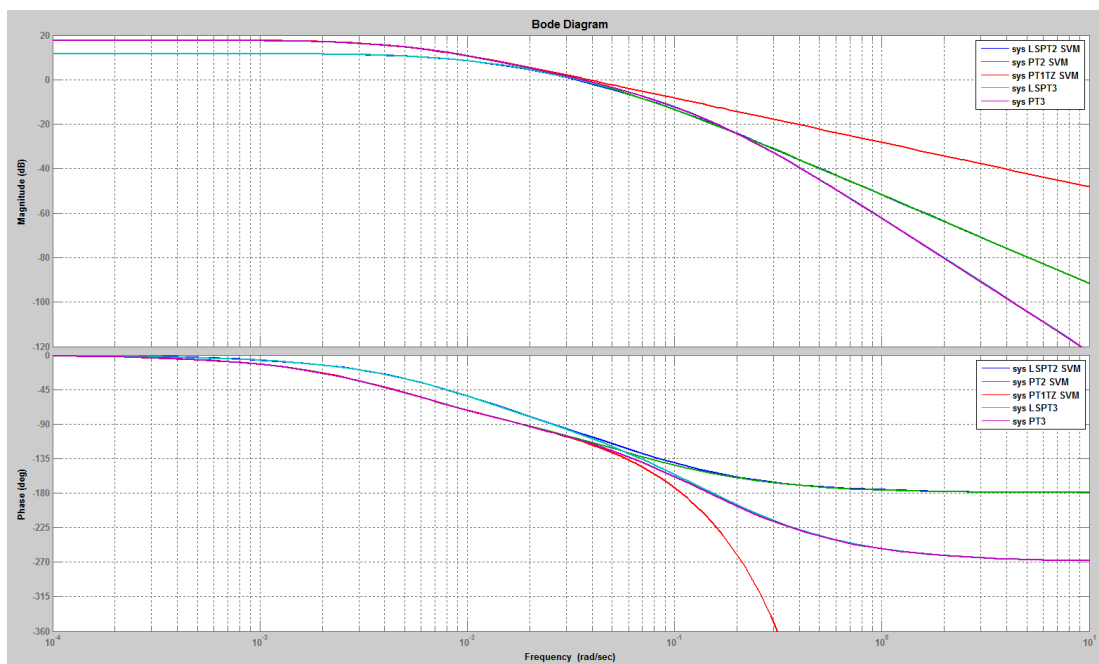


Abb. 5.3 Bode-Diagramm der Näherungsmodelle des Systems Gotschna mit Längslüftung (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $v_{Lin} = v_{soll} = 3 \text{ m/s}$ ,  $T_{SV} = 5 \text{ s}$ ,  $T_M = 10 \text{ s}$ ,  $n_{SV} = 24$ )

Bemerkungen:

- Bei allen Näherungsmodellen sinkt die Amplitude bei steigender Frequenz. Es handelt sich bei allen Näherungsmodellen um Tiefpässe.
- Alle Näherungsmodelle sind überkritisch gedämpft.

- Das Linearisierte System PT2 und das System PT2 sind Tiefpässe 2. Ordnung. Beide haben 2 Eckfrequenzen.
- Das Linearisierte System PT3 und das System PT3 sind Tiefpässe 3. Ordnung. Beide haben 3 Eckfrequenzen.
- Das System PT1TZ hat nur eine Eckfrequenz.

### 5.6.2 Ortskurve System LL

Eine alternative anschauliche Darstellung des Frequenzgangs ist seine Ortskurve. Dieses Zeigerbild enthält im Gegensatz zum Bode-Diagramm beide Informationen: Die Zeigerlänge entspricht dem Amplitudenverhältnis, sein Argument  $\varphi$  ist die Phasenverschiebung.

Die in der Regelungstechnik verwendete Ortskurve des Frequenzgangs wird auch Nyquist-Diagramm genannt. Mit der Vorstellung, dass in der (komplexen) Ebene lediglich die Spitzen eingefrorener Zeiger, die umlaufend Schwingungen als Kreisbewegungen darstellen, zur Ortskurve verbunden sind, kann der Frequenzgang ohne Kenntnis der komplexen Mathematik und der mathematischen Transformationen aus dem Zeit- in den Frequenzbereich anschaulich gemacht werden.

Abb. 5.4 zeigt das Nyquist-Diagramm der Näherungsmodelle des Systems Längslüftung am Beispieeltunnel Gotschna:

- Linearisiertes Modell PT2
- Tiefpass 2. Ordnung
- Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit
- Linearisiertes Modell PT3
- Tiefpass 3. Ordnung

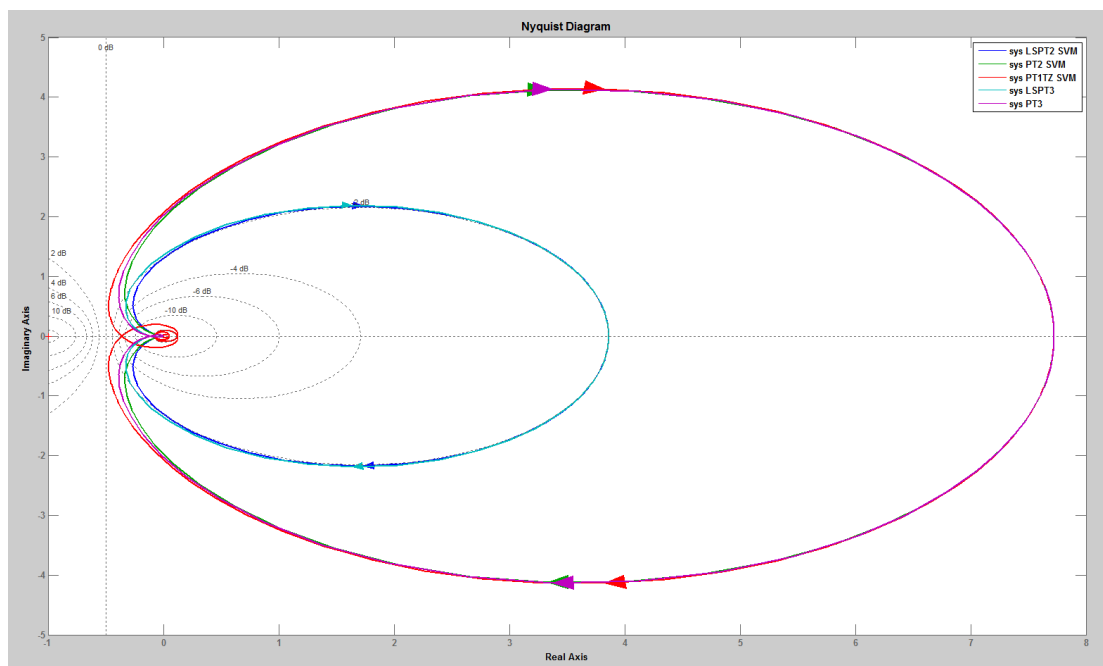


Abb. 5.4 Nyquist-Diagramm der Näherungsmodelle des Systems Gotschna mit Längslüftung (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $v_{Lin} = v_{soll} = 3 \text{ m/s}$ ,  $T_{SV} = 5 \text{ s}$ ,  $T_M = 10 \text{ s}$ ,  $n_{SV} = 24$ )

Bemerkungen:

- Keines der Näherungsmodelle umläuft den „kritischen Punkt“  $(-1, 0 \cdot j)$
- Alle Näherungsmodelle sind somit asymptotisch stabil

## 6 Grundausslegung einer Regelung

### 6.1 Vorgabe an Absaugung und Längsströmungskontrolle

Die Schweizer Richtlinie Lüftung der Strassentunnel [1] beschreibt, wann und auf welchen Wert die Längsströmung geregelt werden soll (siehe Kapitel 1.2). Sie behandelt aber nicht explizit die kritischen Fälle, wie zum Beispiel kurze Tunnel mit Gegenverkehr. In solchen Fällen liegt das Problem hauptsächlich bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Diese kann nach wenigen Minuten durch die Rauchausbreitung keine gültige Messung mehr liefern. Durch das Ausschalten der Strahlventilatoren welche sich im Rauch befinden, geht zudem die Leistungsfähigkeit der Lüftungsanlage zurück. Die Regelung kann nicht alle physikalischen Probleme lösen.

Ein weiterer Punkt liegt bei der Lüftungsanlage und deren Leistung. Jedes physikalische System hat begrenzte Ein- und Ausgänge (z.B. maximale Anzahl Strahlventilatoren). Das heisst, dass das modellierte System nur in einem spezifischen Bereich gültig ist. Der Regler muss so ausgelegt werden, dass diese Einschränkung im Regler beinhaltet ist.

Die Auslegung der Lüftung basiert auf einem stationären Fall und nicht auf der Dynamik am Anfang der Regelung. Je nach Regler kann die geforderte Anzahl Strahlventilatoren die tatsächlich installierte/verfügbare Anzahl überschreiten (Sättigung). Das kann in einem späteren Regelschritt eine Überreaktion des Reglers zur Folge haben. Um eine solche Überreaktion zu vermeiden gibt es grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

- Den Sollwert nicht mit einem Sprung, sondern mit einer Rampe einstellen
- Den Regler mildern/dämpfen
- Anti-Windup einbauen (PI-/PID-Regelung)
- Maximale Anzahl SV im Regler limitieren (MPC-Regelung)

Eine Rampe des Sollwerts ermöglicht einen milden Übergang zwischen Steuerung und Regelung und vermeidet eine Sättigung von Aktoren. Ein Beispiel ist in Abb. 6.1 dargestellt (Sprung und Rampe über 5 min).

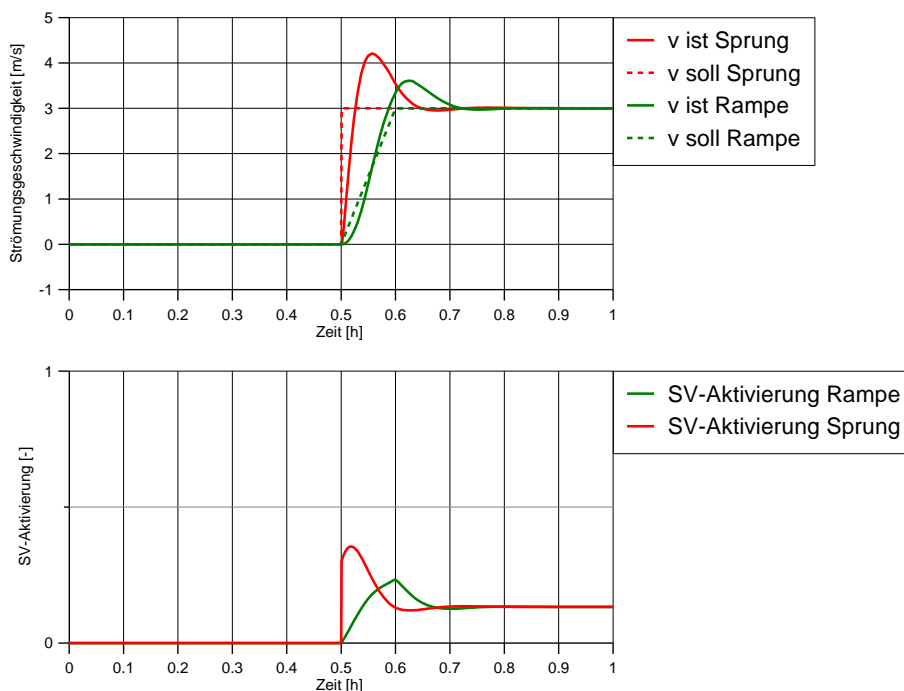


Abb. 6.1 Sprungantwort und Rampenantwort

Die Einführung einer Rampe läuft jedoch wieder auf einen Kompromiss hinaus. Das

Überschwingen wird gemildert, aber das Regelungsziel wird erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Auch das Mildern der Regler läuft auf einen Kompromiss hinaus, ähnlich wie die Rampe des Sollwerts.

Die letzten zwei Möglichkeiten (Anti-Windup und Begrenzung der Anzahl SV im Regler) werden in der Auslegung der Regler detailliert betrachtet.

## 6.2 Anforderung und Umsetzung

Der Idealfall einer Regelung soll die folgenden Anforderungen erfüllen (die Begriffe sind in Anhang I erklärt):

- Eine möglichst robuste Regelung (Störgrößen)
- Eine möglichst stabile Regelung (kein Schwingen)
- Eine möglichst schnelle Regelung (kleine Totzeit, kleine Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, kleine Einschwingzeit ab Regelungsbeginn)
- Eine möglichst kleine Überschwingung
- Ein möglichst kleiner Schleppfehler (bleibende Regelabweichung)

Der Regler kann mit der Sprungantwort beurteilt werden. Ein Beispiel ist in Abb. 6.2 mit den beurteilten Parametern dargestellt.

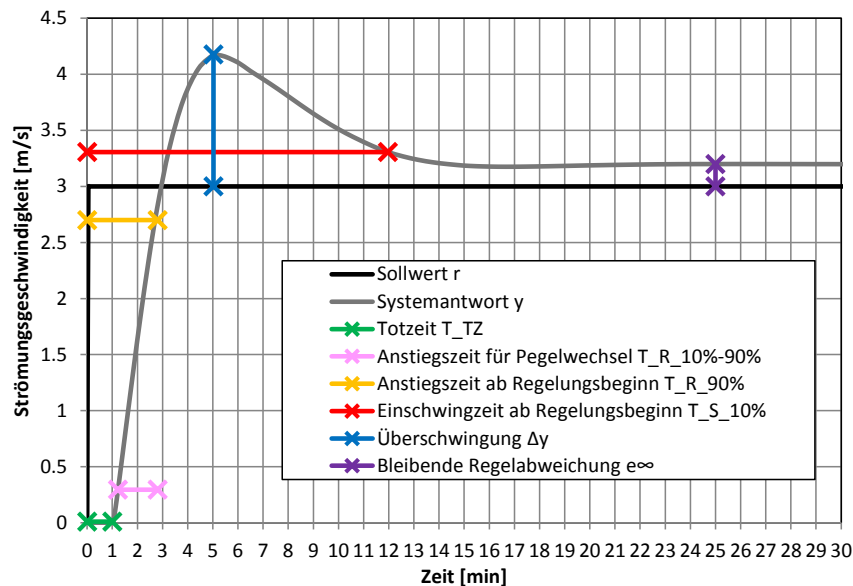


Abb. 6.2 Definition von Auslegungsparametern für Sprungantwort im Zeitbereich

Heute werden diese Anforderungen nur vage (oder gar nicht) an den Steuerungsbauer formuliert. Diese Anforderungen sollten in genaue, technische Spezifikationen umgesetzt werden, welche dann bei der Inbetriebsetzung der Tunnellüftung quantitativ gemessen werden können.

Für das Design des Reglers kann man die obengenannten Spezifikationen umsetzen, zum Beispiel:

- Schnelle Regelung → Anstiegszeit ab Regelungsbeginn  $T_{R90} < T_{R90max}$   
→ Einschwingzeit ab Regelungsbeginn  $T_{S10} < T_{S10max}$   
→ Totzeit  $T_{TZ} < T_{TZmax}$
- Kleine Überschwingung → Überschwingung des Sollwerts  $\Delta y < \Delta y_{max}$
- Kleiner Schleppfehler → Ein Integrator soll im Regler enthalten sein
- Stabile Regelung → Beim Closed-Loop alle Pole in der linken Halbebene

## 6.3 Auswahl eines Reglers

Es gibt verschiedene Methoden für die Synthese eines (robusten) Reglers:

- PID
- Fuzzy Control
- Adaptive Regelung
- LQ-Regelung (LQR, LQG, LTR)
- $H_\infty$ ,  $\mu$ -Synthesis
- Model Predictive Control (MPC)

Die Mehrzahl der Methoden ist jedoch kompliziert und schwierig umzusetzen. Eine detaillierte Studie aller möglichen Regelungen würde eine ausserordentlich aufwendige Studie erfordern.

Heutzutage werden meistens PI-/PID-Regler oder Modellbasierte Regler („Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“) verwendet. Die MPC-Regelung bietet mehr Möglichkeiten als andere Methoden, ist jedoch etwas komplizierter auszulegen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden die folgenden Regler für die Anwendung bei der Kontrolle der Längsströmung untersucht bzw. verglichen:

- Klassische Regelung (PI- und PID-Regler)
- Model Predictive Control (MPC)
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“)

## 6.4 Regelungsziele im Brandfall

### 6.4.1 Regelungsziel beim System Längslüftung

Beim System mit Längslüftung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$  geregelt.

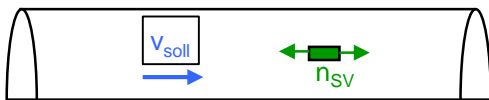


Abb. 6.3 *Regelungsziel beim System Längslüftung: Regelung auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit*

Je nachdem, ob es sich um Richtungsverkehr mit oder ohne Stau oder um Gegenverkehr handelt, wird gemäss [1] auf eine andere Strömungsgeschwindigkeit geregelt:

Regelungsziel bei Richtungsverkehr ohne Stau gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 3 \text{ [m/s]} \quad 6-1$$

Mit:

$$v_{\text{soll}} \quad \text{Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel} \quad \text{[m/s]}$$

Regelungsziel bei Richtungsverkehr mit Stau oder Gegenverkehr gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 1 \text{ [m/s]} \quad 6-2$$

### 6.4.2 Regelungsziel beim System mit Absaugung und Symmetrischer Regelung

Bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr wird bei Systemen mit Absaugung gemäss [1] auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

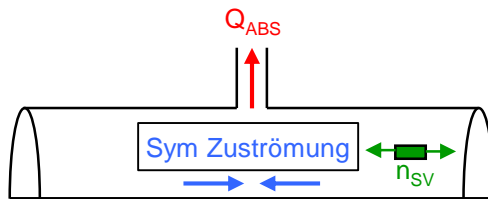


Abb. 6.4 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr: Symmetrische Anströmung zur Absaugstelle

Regelungsziel beim System mit Absaugung bei Richtungsverkehr mit Stau oder Gegenverkehr gemäss [1]:

$$v_{L\_soll} = -v_{R\_soll} = \frac{Q_{ABS}}{2 \cdot A_T} \quad 6-3$$

Mit:

$v_{L\_soll}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit des linken Lüftungsabschnitts	[m/s]
$v_{R\_soll}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit des rechten Lüftungsabschnitts	[m/s]
$Q_{ABS}$	Volumenstrom der Absaugung	[m <sup>3</sup> /s]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]

Für die Absaugmenge  $Q_{ABS}$  gilt:

$$Q_{ABS} = v_{L\_mess} \cdot A_T - v_{R\_mess} \cdot A_T \quad 6-4$$

Mit:

$v_{L\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit links	[m/s]
$v_{R\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit rechts	[m/s]

Und somit ergibt sich für  $v_{L\_soll}$ :

$$v_{L\_soll} = \frac{v_{L\_mess} - v_{R\_mess}}{2} \quad 6-5$$

### 6.4.3 Regelungsziel beim System mit Absaugung und Regelung von $v_L$

Bei Richtungsverkehr ohne Stau wird bei Systemen mit Absaugung gemäss [1] die Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts von der Absaugstelle in Verkehrsrichtung auf einen Sollwert geregelt.

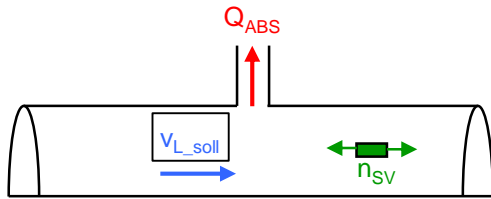


Abb. 6.5 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr ohne Stau: Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

Regelungsziel beim System mit Absaugung bei Richtungsverkehr ohne Stau gemäss [1]:

$$v_{L\_soll} = 3 \text{ [m/s]}$$

6-6

## 6.5 Regelungskreise der Systeme Längslüftung und Absaugung

Um das System Tunnel mit Strahlventilatoren möglichst real zu modellieren, müssen auch die Messung der Strömungsgeschwindigkeit und die limitierte Einschalttrate der Strahlventilatoren miteinbezogen werden.

Folgende Modelle sollen in den Regelungskreis miteinbezogen werden:

- Limitierte SV-Einschaltrate (Rampenfunktion)
- Dynamik der Strahlventilatoren (Tiefpass 1. Ordnung)
- Dynamik des Tunnels (nicht lineares Modell)
- Messung der Strömungsgeschwindigkeit (Tiefpass 1. Ordnung)

### 6.5.1 Regelungskreis des Systems Längslüftung

Abb. 6.6 und Abb. 6.7 zeigen den Regelkreis für die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel mit Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung.

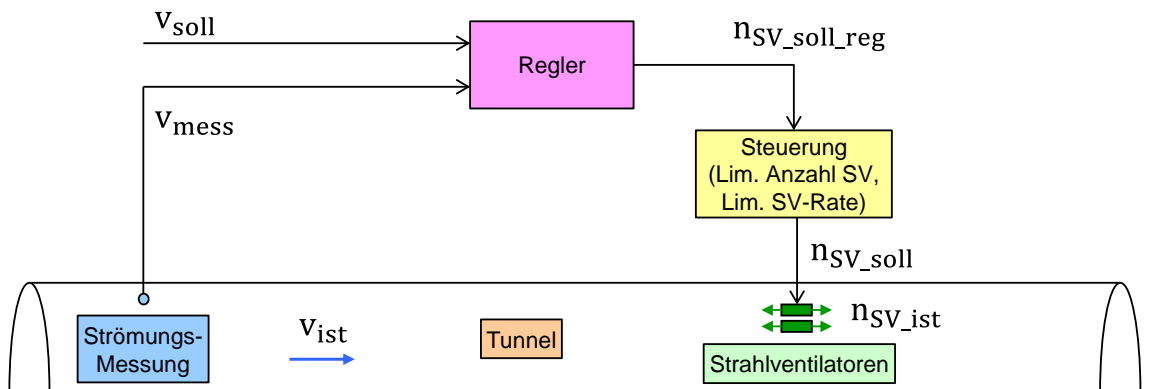


Abb. 6.6 Schematischer Regelungskreis für Regelung der Strömungsgeschwindigkeit: Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

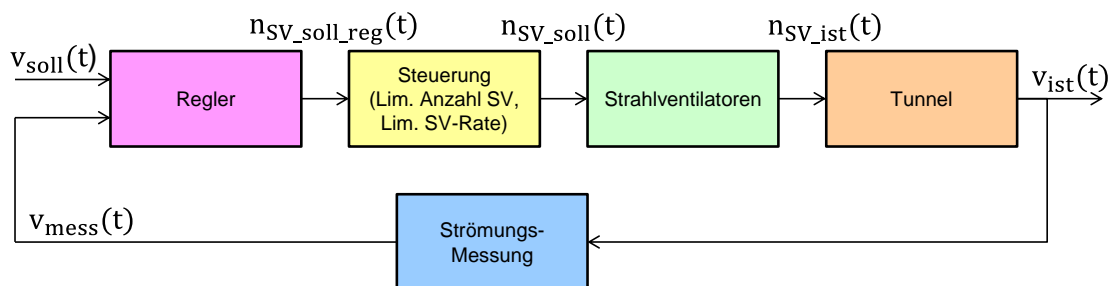


Abb. 6.7 Signalflussbild: Regelungskreis für Regelung der Strömungsgeschwindigkeit: Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 6.5.2 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung

Abb. 6.8 und Abb. 6.9 zeigen den Regelkreis für symmetrische Regelung mit Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung.

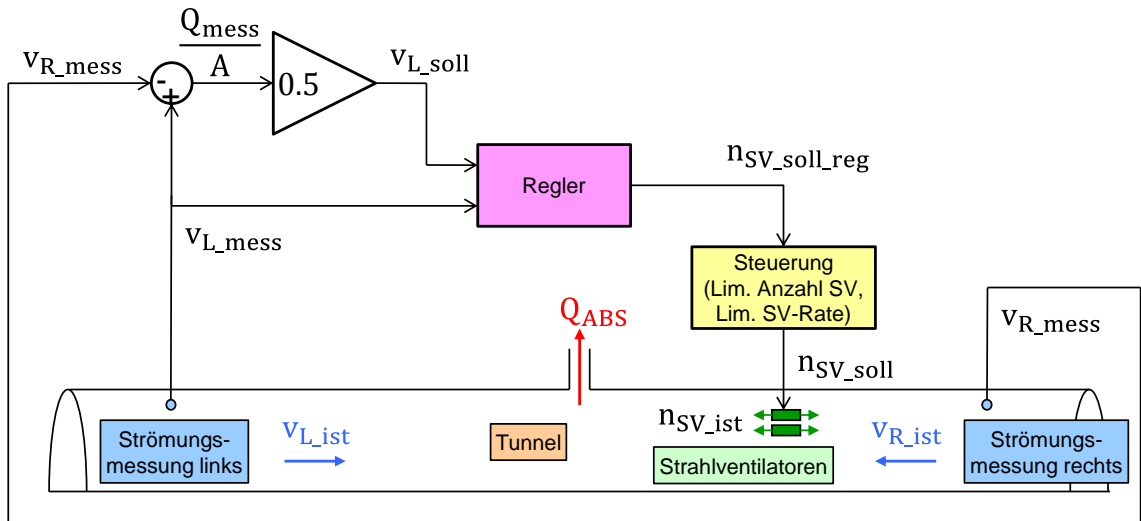


Abb. 6.8 Schematischer Regelkreis für symmetrische Regelung: Regler, Steuerung, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

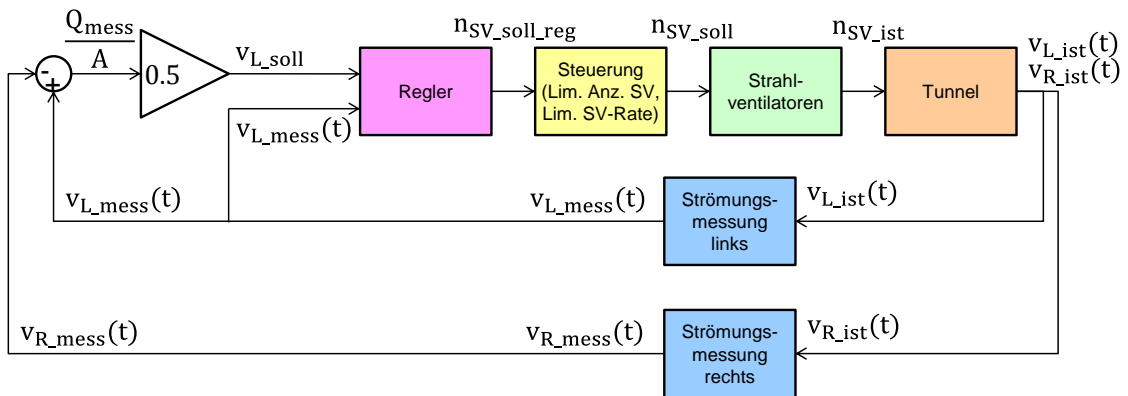


Abb. 6.9 Signalflussbild: Regelkreis für symmetrische Regelung: Regler, Steuerung, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 6.5.3 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$

Abb. 6.10 und Abb. 6.11 zeigen den Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit mit Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung.

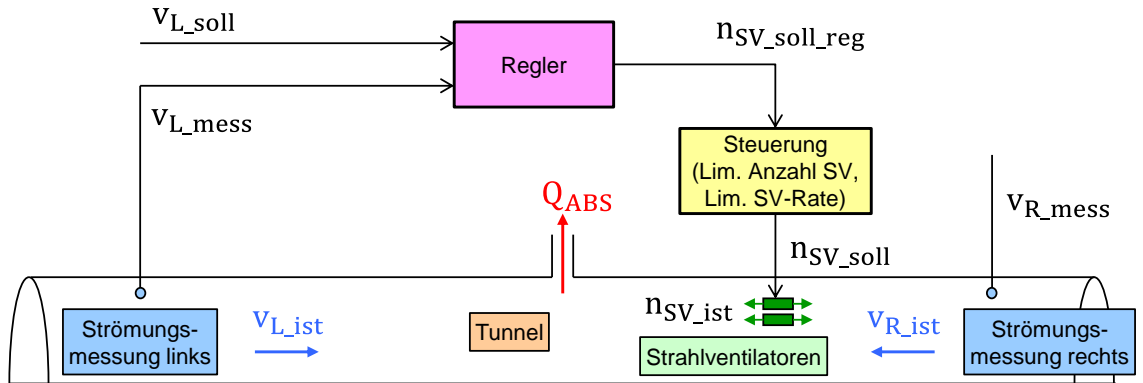


Abb. 6.10 Schematischer Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit: Regler, Steuerung, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

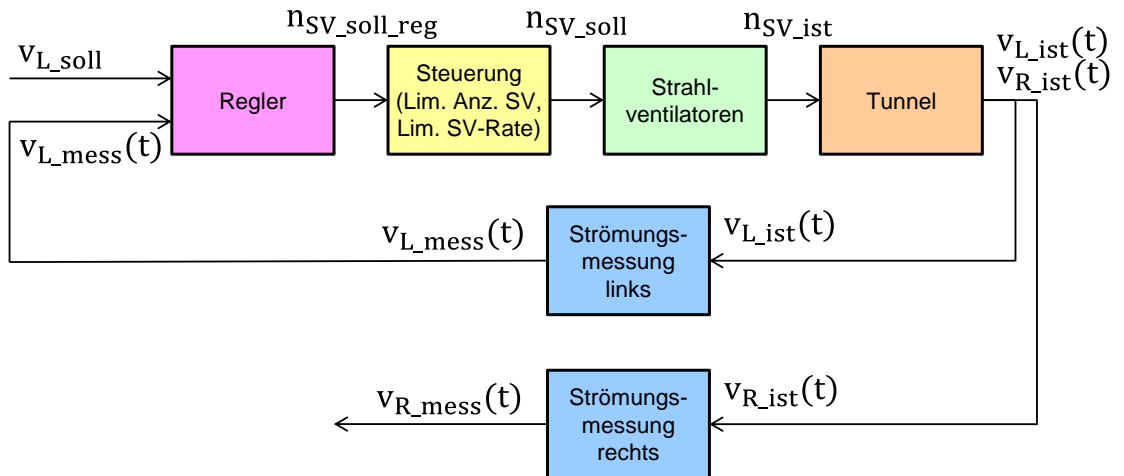


Abb. 6.11 Signalflussbild: Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit: Regler, Steuerung, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

## 7 PID-Regler

Der PID-Regler ist per Definition SISO (Single Input, Single Output). Eine Lüftungsanlage kann jedoch aus mehreren Messungen und Aktoren bestehen. Je nachdem müssen mehrere PID-Regler verwendet werden.

Im betrachteten System gibt es jedoch nur eine Eingangsgrösse (Aktivierung der Strahlventilatoren) und eine Ausgangsgrösse (Luftgeschwindigkeit im Tunnelabschnitt).

### 7.1 Formen von PID-Reglern

#### 7.1.1 Idealer PID-Regler (mit idealem D-Glied)

Ein PID Regler besteht aus drei Hauptteilen:

- Ein proportionaler Anteil
- Ein integraler Anteil
- Ein derivativer Anteil

Abb. 7.1 und Abb. 7.2 zeigen den idealen PID-Regler in paralleler Form und in der Standardform.

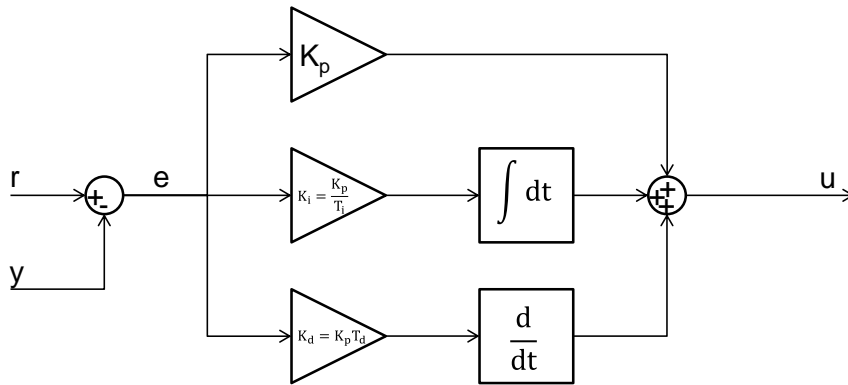


Abb. 7.1 Idealer PID-Regler in paralleler Form

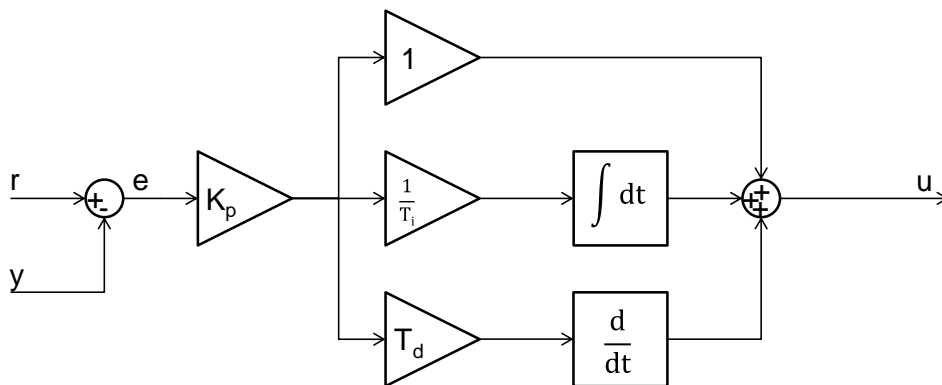


Abb. 7.2 Idealer PID-Regler in Standardform

Die Übertragungsfunktion des idealen PID-Reglers im Zeitbereich:

$$u(t) = \underbrace{K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau}_{\text{Parallele Form}} + \underbrace{K_d \frac{de(t)}{dt}}_{\text{Standardform}} = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad 7-1$$

Mit:

$u(t)$	Stellgrösse (z.B. Anzahl Strahlventilatoren)	
$e(t)$	Fehler (z.B. Strömungsgeschwindigkeit)	
$K_p$	Verstärkung P-Anteil	
$K_i$	Verstärkung I-Anteil	[1/s]
$K_d$	Verstärkung D-Anteil	[s]
$T_i$	Nachstellzeit	[s]
$T_d$	Vorhaltzeit	[s]

Und im Frequenzbereich:

$$G_{\text{PID}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \underbrace{K_p + \frac{K_i}{s}}_{\text{Parallele Form}} + \underbrace{K_d \cdot s}_{\text{Standardform}} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad 7-2$$

Wobei:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad 7-3$$

Und:

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad 7-4$$

### 7.1.2 PI-Regler

Der derivative Teil wird oft weggelassen ( $K_d = T_d = 0$ ). In diesem Fall spricht man von einem PI-Regler.

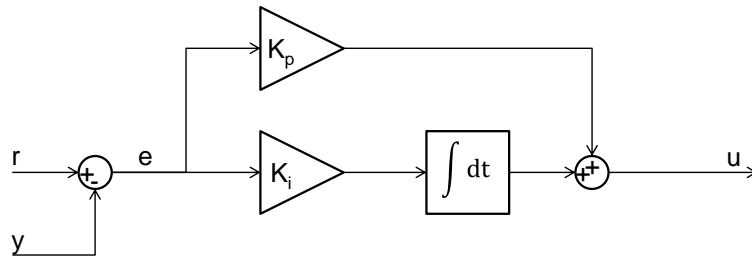


Abb. 7.3 PI-Regler in paralleler Form

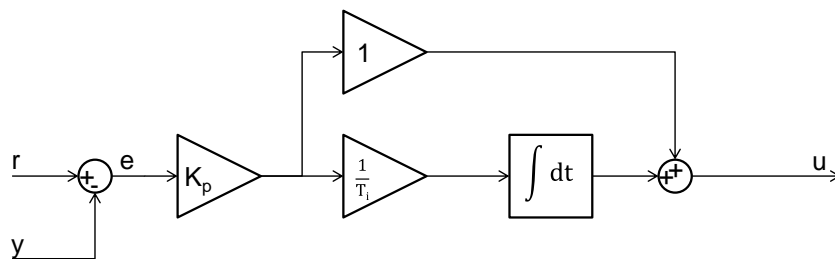


Abb. 7.4 PI-Regler in Standardform

Grosser Vorteil des PI-Reglers gegenüber dem PID-Regler: Der Regler benötigt nur 2 Einstellparameter ( $K_p$  und  $T_i$ )

### 7.1.3 Realer PID-Regler (PIDF-Regler mit realem D-Glied)

Die Sprungantwort des idealen D-Gliedes ist eine Stossfunktion mit theoretisch unendlicher Grösse. Dies ist technisch nicht realisierbar. Deshalb wird der Übertragungsfunktion des D-Anteils eine kleine Verzögerung (PT1-Glied) mit der Zeitkonstante  $\tau_{PT1}$  hinzugefügt (siehe Abb. 7.5, PT1-Glied grün dargestellt).

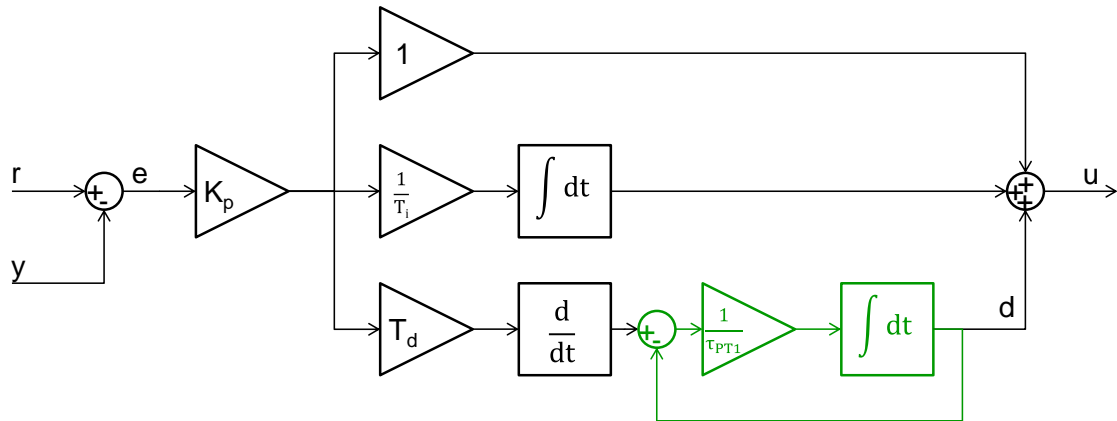


Abb. 7.5 Realer PID-Regler (PIDF-Regler) in Standardform

Die Übertragungsfunktion des realen PID-Reglers (PIDF-Regler) setzt sich im Zeitbereich aus 2 Gleichungen zusammen:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + d(t) \quad 7-5$$

$$d(t) = \frac{1}{\tau_{PT1}} \int_0^t \left( K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} - d(t) \right) d\tau \quad 7-6$$

Mit:

$\tau_{PT1}$  Zeitkonstante des PT1-Glieds [s]

Im Frequenzbereich lässt sich die Übertragungsfunktion einfacher darstellen:

$$G_{PIDF}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{\tau_{PT1} \cdot s + 1} \right) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{\frac{T_d}{N_d} \cdot s + 1} \right) \quad 7-7$$

Wobei:

$$\tau_{PT1} = \frac{T_d}{N_d} \quad 7-8$$

Mit:

$N_d$  Filterdivisor [-]

Es gilt:

$$T_d \gg \tau_{PT1} \quad 7-9$$

### 7.1.4 PI-/PID-Regler mit Anti-Windup

Die Stellgrösse (in diesem Fall die Anzahl Strahlventilatoren) ist in einem realen System begrenzt. Wenn zum Beispiel auf eine sehr grosse Strömungsgeschwindigkeit (grosser Sollwert) geregelt wird, kann es sein, dass mehr Strahlventilatoren vom Regler verlangt werden, als tatsächlich vorhanden sind. In diesem Fall spricht man von Sättigung der Aktoren.

Wird die Sättigung erreicht, tritt ein sogenannter Windup-Effekt ein. Da nicht genug Strahlventilatoren vorhanden sind, wird der Sollwert  $w(t)$  der Strömungsgeschwindigkeit nicht erreicht. Dadurch bleibt eine Regelabweichung  $e(t)$  zwischen Sollwert  $w(t)$  und Istwert  $y(t)$  und der Integrator integriert immer weiter und die Stellgrösse  $u(t)$  (verlangte Anzahl Strahlventilatoren) wird immer grösser und grösser. Wird nun der Sollwert  $w(t)$  gesenkt, entsteht beim Rücklauf der Stellgrösse  $u(t)$  eine ungewollte Verzögerung.

Um die Integration bei Überschreitung der Sättigung zu begrenzen wird ein Anti-Windup eingebaut.

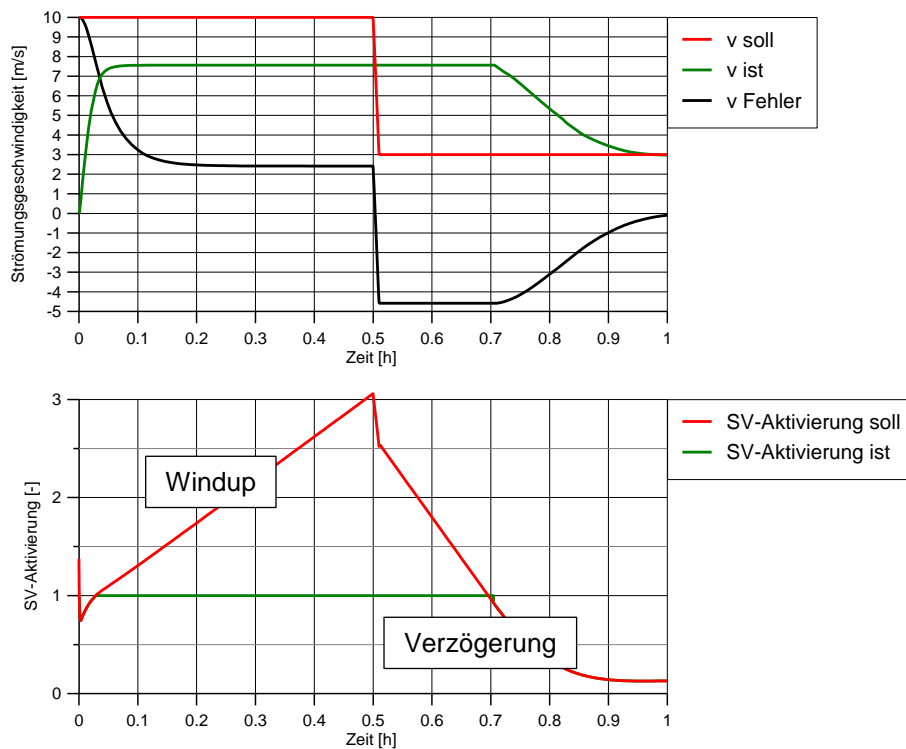


Abb. 7.6 Beispiel PID-Regelung ohne Anti-Windup

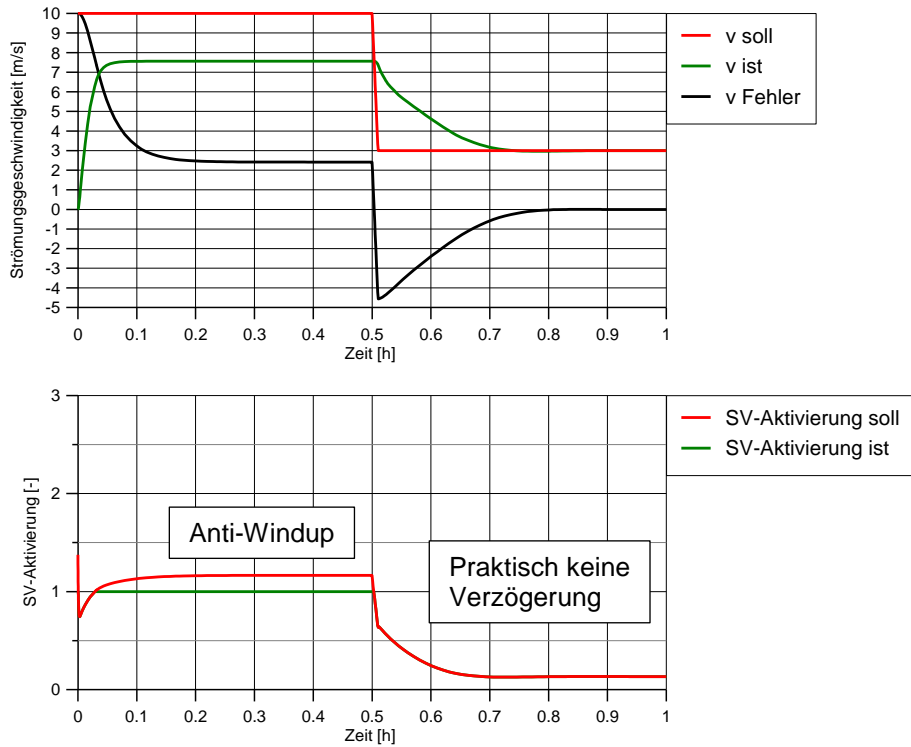


Abb. 7.7 Beispiel PID-Regelung mit Anti-Windup

Die Struktur des Anti-Windup ist in Abb. 7.8 in roter Farbe dargestellt.

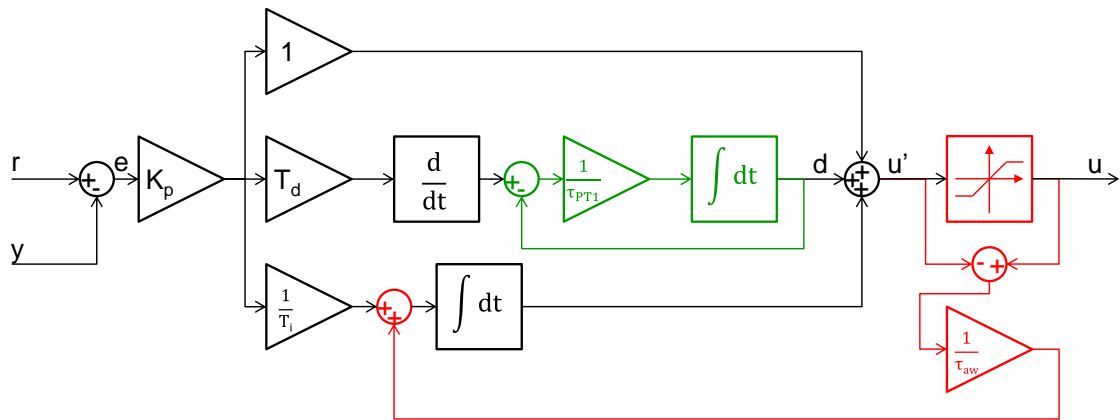


Abb. 7.8 Struktur eines Anti-Windup integriert in einen realen PID-Regler

Für die Verstärkung des Anti-Windup  $K_{aw}$  gilt:

$$K_{aw} = \frac{1}{\tau_{aw}} = \frac{1}{T_i \cdot N_{aw}} \quad 7-10$$

Mit:

$K_{aw}$	Verstärkung des Anti-Windup	[-]
$\tau_{aw}$	Zeitkonstante des Anti-Windup	[s]
$N_{aw}$	Faktor des Anti-Windup	[-]

Der Parameter  $\tau_{aw}$  ist eine Zeitkonstante.  $\tau_{aw}$  soll klein gewählt werden so dass der Anti-Windup Effekt gewährleistet ist. Zu kleine Werte führen jedoch zu schlechten Regelungs-

eigenschaften. Als Faustregel gilt  $T_d < \tau_{aw} < T_i$  oder  $\tau_{aw} = T_i$  wenn die Regelungsleistung Vortritt hat.

Zusammenfassung der Parameter des PIDF-Reglers mit Anti-windup:

$K_p$	Verstärkung P-Anteil	
$T_i$	Nachstellzeit	[s]
$T_d$	Vorhaltzeit	[s]
$N_d$	Filterdivisor	[-]
$N_{aw}$	Faktor des Anti-Windup	[-]

Wobei:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad 7-11$$

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad 7-12$$

$$\tau_{PT1} = \frac{T_d}{N_d} \quad 7-13$$

$$K_{aw} = \frac{1}{\tau_{aw}} = \frac{1}{T_i \cdot N_{aw}} \quad 7-14$$

Mögliche Vereinfachungen des PIDF-Reglers mit Anti-Windup:

- Der derivative Anteil wird ausgeschaltet wenn  $T_d = 0$  (PI-Regler)
- Der derivative Anteil wird idealer wenn  $N_d \rightarrow \infty$  bzw. wenn  $\tau_{PT1} \rightarrow 0$
- Der Anti-Windup Effekt wird ausgeschaltet, wenn  $K_a = 0$  bzw.  $\tau_{aw} \rightarrow \infty$  bzw.  $N_{aw} \rightarrow \infty$

## 7.2 Auswahl der Parameter und Tuning

Tab. 7.1 zeigt den Effekt von Veränderung der einzelnen Parameter.

Erhöhung von Parameter	Anstiegszeit	Überschwingung	Einschwingzeit
$K_p$	Reduzierung	Zuwachs	Keine Änderung
$T_i$	Reduzierung	Zuwachs	Zuwachs
$T_d$	Keine Änderung	Reduzierung	Reduzierung

Tab. 7.1 Einfluss von Veränderungen der Parameter auf PID-Regler

## 7.3 Klassische Folgeregelung

Abb. 7.9 zeigt das Signalflussbild einer klassischen Folgeregelung

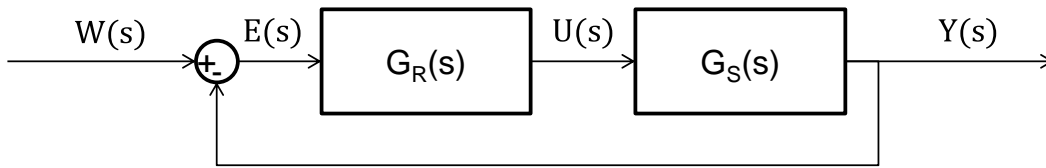


Abb. 7.9 Signalflussbild einer klassischen Folgeregelung

Mit:

$G_R(s)$  = Übertragungsfunktion des Reglers

$G_S(s)$  = Übertragungsfunktion des Systems

$W(s)$  = Sollwert

$E(s)$  = Fehler

$U(s)$  = Stellgrösse (z.B. Strahlventilatoren)

$Y(s)$  = Regelgrösse (z.B. Strömungsgeschwindigkeit)

Für einige Untersuchungsverfahren der Regelstrecke (z.B. Stabilität des Regelstystems mit Nyquist-Kriterium) wird der Regelkreis „aufgeschnitten“. Abb. 7.10 zeigt das Signalflussbild einer klassischen Folgeregelung mit offenem Regelkreis.

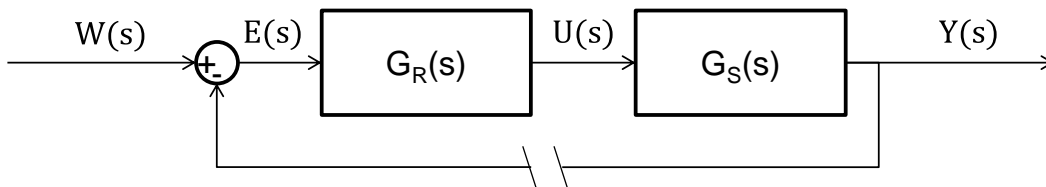


Abb. 7.10 Signalflussbild einer Regelung mit aufgeschnittenem Regelkreis

Die Übertragungsfunktion des Regelstystems  $G_{\text{Geregelt}}(s)$  ergibt:

$$G_{\text{Geregelt}}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)} = \frac{G_O(s)}{1 + G_O(s)} \quad 7-15$$

$G_O(s)$  ist die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Regelkreises.

$$G_O(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = G_R(s) \cdot G_S(s) \quad 7-16$$

### 7.3.1 Übertragungsfunktion des Reglers

Die Übertragungsfunktion des PIDF-Reglers  $G_{\text{PIDF}}(s)$  (siehe Kapitel 7.1.3):

$$G_{\text{R,PIDF}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{T_{\text{PT1}} \cdot s + 1} \right) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{\frac{T_d}{N_d} \cdot s + 1} \right) \quad 7-17$$

Übertragungsfunktion des PI-Reglers  $G_{\text{PI}}(s)$  (siehe Kapitel 7.1.2):

$$G_{\text{R,PI}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad 7-18$$

### 7.3.2 Übertragungsfunktion des Systems

Die Übertragungsfunktion des Systems ist das Produkt der einzelnen Modelle (Strahlventilator, Tunnel und je nachdem die Messung).

$$G_{S\_LL}(s) = G_{Tunnel}(s) \cdot G_{SV}(s) \cdot G_{mess}(s) = \frac{v_{mess}(s)}{n_{SV\_soll}(s)} \quad 7-19$$

In Kapitel 4 wurden die Übertragungsfunktionen  $G_{S\_LL}(s)$  verschiedener Modelle des Systems Längslüftung hergeleitet.

Die Übertragungsfunktion des Linearisierten Systems:

$$G_{S\_LL\_Lin}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{b_T}{\frac{2a_T |v_{Lin}|}{K_{T\_Lin}}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\frac{2a_T |v_{Lin}|}{\tau_{T\_Lin}}} \cdot s + 1 \right) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 7-20$$

Für die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpass 2. Ordnung gilt:

$$G_{S\_LL\_PT2}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}}{\frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{(\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 7-21$$

Die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpasses 1. Ordnung mit Totzeit ist:

$$G_{S\_LL\_PT1TZ}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soll}(s)} = \frac{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV\_end}}}{\frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV\_end}}} \cdot s + 1} \cdot e^{-T_{SV\_TZ} \cdot s} \quad 7-22$$

## 7.4 Einstellwerte nach Ziegler/Nichols

Die Methode von Ziegler und Nichols ist ein heuristisches Verfahren zur Bestimmung von Regelparametern. Der resultierende Regler kann ein P-, PI- oder PID-Regler sein.

Das Verfahren steht in zwei Varianten zur Verfügung:

- Frequency Response Method
- Step Response Method

### 7.4.1 Ziegler/Nichols Frequency Response Method

Der Regelkreis wird mit Hilfe eines proportionalen Reglers geschlossen und die Regelverstärkung solange erhöht, bis der Ausgang des Regelkreises bei konstantem Eingang eine Dauerschwingung mit der Periode  $T_{krit}$  bei der Regelverstärkung  $K_{P\_krit}$  ausführt.

Benötigte Kennzahlen:

- Kritische Verstärkung  $K_{P\_krit}$
- Schwingungsperiode bei kritischer Verstärkung  $T_{krit}$

Es gilt:

$$T_{krit} = \frac{2\pi}{\omega_{krit}} \quad 7-23$$

Die kritische Verstärkung bekommt man, indem man das System mit einem P-Regler regelt:

$$G_{R,P}(s) = K_P \quad 7-24$$

Für den offenen Regelkreis ergibt sich:

$$G_0(s) = K_P \cdot G_S(s) \quad 7-25$$

Für das Regelsystem ergibt sich:

$$G_{Geregelt}(s) = \frac{K_P \cdot G_S(s)}{1 + K_P \cdot G_S(s)} \quad 7-26$$

Für die Pole gilt somit:

$$G_{Geregelt}(s) = 1 + K_{P\_krit} \cdot G_S(s) = 0 \quad 7-27$$

Einstellregeln nach Ziegler Nichols

Regler	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P-Regler	$K_P = 0.5 \cdot K_{P\_krit}$		
PI-Regler	$K_{PI\_P} = 0.45 \cdot K_{P\_krit}$	$T_{PI\_i} = 0.85 \cdot T_{krit}$	
PD-Regler	$K_{PD\_P} = 0.55 \cdot K_{P\_krit}$		$T_{PD\_d} = 0.15 \cdot T_{krit}$
PID-Regler	$K_{PID\_P} = 0.6 \cdot K_{P\_krit}$	$T_{PID\_i} = 0.5 \cdot T_{krit}$	$T_{PID\_d} = 0.12 \cdot T_{krit}$

Tab. 7.2 Einstellregeln nach Ziegler/Nichols mit Frequency Response Method

Auf das System Längslüftung angewendet (z.B. Tiefpass 2. Ordnung):

$$G_{S\_PT2}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV\_soil}(s)} = K_{T\_PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T\_PT1} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 7-28$$

Für den offenen Regelkreis ergibt sich:

$$G_0(s) = K_P \cdot G_S(s) = K_P \cdot K_{T_{PT1}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T_{PT1}} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)} \quad 7-29$$

Für das Regelsystem ergibt sich:

$$G_{Geregelt}(s) = \frac{K_P \cdot G_S(s)}{1 + K_P \cdot G_S(s)} = \frac{K_P \cdot K_{T_{PT1}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T_{PT1}} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)}}{1 + K_P \cdot K_{T_{PT1}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T_{PT1}} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)}} \quad 7-30$$

Für die Pole gilt somit:

$$1 + K_{P_{krit}} \cdot K_{T_{PT1}} \cdot \frac{1}{(\tau_{T_{PT1}} \cdot s + 1)(\tau_{SV} \cdot s + 1)} = 0 \quad 7-31$$

Umgeformt

$$-K_{P_{krit}} \cdot K_{T_{PT1}} = (\tau_{T_{PT1}} \cdot s + 1) \cdot (\tau_{SV} \cdot s + 1) \quad 7-32$$

Mit  $s = j\omega$

$$\begin{aligned} -K_{P_{krit}} \cdot K_{T_{PT1}} &= (\tau_{T_{PT1}} \cdot j\omega_{krit} + 1) \cdot (\tau_{SV} \cdot j\omega_{krit} + 1) \\ &= \underbrace{j^2}_{-1} \cdot \tau_{T_{PT1}} \cdot \tau_{SV} \cdot \omega_{krit}^2 + j\omega_{krit} \cdot (\tau_{T_{PT1}} + \tau_{SV}) + 1 \end{aligned} \quad 7-33$$

Umgeformt:

$$\underbrace{-K_{P_{krit}} \cdot K_{T_{PT1}} + \tau_{T_{PT1}} \tau_{SV} \omega_{krit}^2 - 1}_{\text{Realteil}=0} - \underbrace{j\omega_{krit}(\tau_{T_{PT1}} + \tau_{SV})}_{\text{Imaginärteil}=0} = 0 \quad 7-34$$

Daraus ergibt sich:

$$K_{P_{krit}} = -\frac{1}{K_{T_{PT1}}} \quad 7-35$$

$$\omega_{krit} = 0 \quad 7-36$$

$$T_{krit} = \frac{2\pi}{\omega_{krit}} = \infty \quad 7-37$$

Die Frequency Response Method kann nicht auf Tiefpässe angewendet werden, da diese nicht schwingen.

## 7.4.2 Ziegler/Nichols Step Response Method

Die Regelstrecke wird einem Übertragungsglied erster Ordnung mit Totzeit (PT1TZ-Glied) angenähert. Mit der Sprungantwort werden folgende Parameter bestimmt:

- Statische Verstärkung  $K$
- Zeitkonstante  $\tau$
- Totzeit  $T_{TZ}$

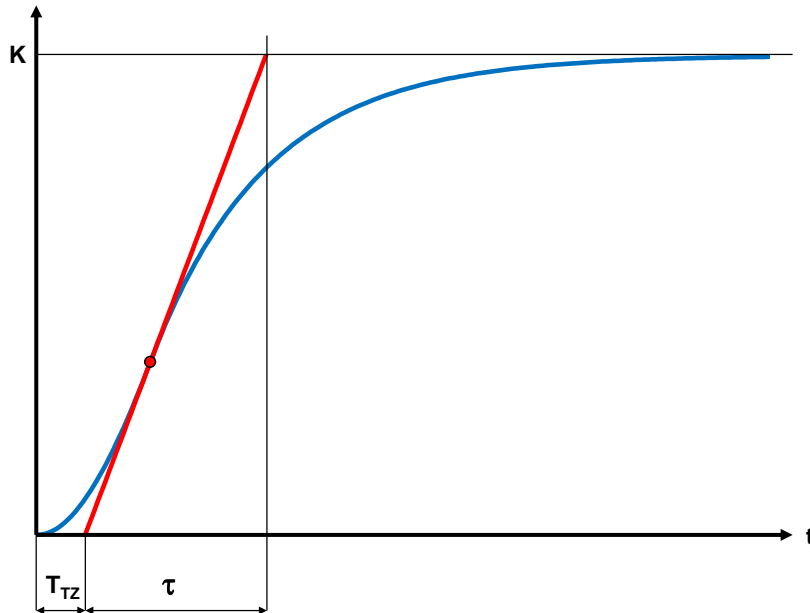


Abb. 7.11 Sprungantwort mit Wendetangente zur Bestimmung von  $T_{TZ}$  und  $\tau$

Einstellregeln nach Ziegler Nichols:

Regler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P-Regler	$K_{P,P} = 1 \cdot \frac{\tau}{K \cdot T_{TZ}}$		
PI-Regler	$K_{PI,P} = 0.9 \cdot \frac{\tau}{K \cdot T_{TZ}}$	$T_{PI,I} = 3.33 \cdot T_{TZ}$	
PID-Regler	$K_{PID,P} = 1.2 \cdot \frac{\tau}{K \cdot T_{TZ}}$	$T_{PID,I} = 2 \cdot T_{TZ}$	$T_{PID,D} = 0.5 \cdot T_{TZ}$

Tab. 7.3 Einstellregeln nach Ziegler/Nichols mit Step Response Method

### Anwendung auf das System Längslüftung

In Kapitel 4.2.3 wurde das System LL bereits als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit beschrieben.

Die Übertragungsfunktion des Systems als Tiefpasses 1. Ordnung mit Totzeit:

$$G_{S,PT1TZ}(s) = \frac{v(s)}{n_{SV,soll}(s)} = K_{T,PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{T,PT1} \cdot s + 1)} \cdot e^{-T_{SV,TZ} \cdot s} \quad 7-38$$

Mit:

$$K = K_{T,PT1} = \sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV}}} \quad 7-39$$

$$\tau = \tau_{T,PT1} = \frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}} \quad 7-40$$

$$T_{TZ} = T_{SV,TZ} \quad 7-41$$

Für die Sprungantwort ergibt sich:

$$v(t) = \underbrace{n_{SV,end} \cdot K_{T,PT1}}_{v_{end}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{\tau_{T,PT1}}(t-T_{SV,TZ})} \right) \quad 7-42$$

Für die Verstärkung des P-Reglers ergibt sich:

$$K_{P,P} = \frac{\tau}{K \cdot T_{TZ}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{a_T \cdot b_T \cdot n_{SV}}}}{\sqrt{\frac{b_T}{a_T \cdot n_{SV}}} \cdot \frac{1}{T_{TZ}}} \quad 7-43$$

Umgeformt ergibt sich:

$$K_{P,P} = \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}} \quad 7-44$$

Mit:

$K_{P,P}$	Verstärkung des P-Reglers	[s/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$T_{TZ}$	Totzeit des Systems	[s]

Der Parameter des P-Anteils ist nur von der Konstante  $b_T$  (Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel) und von der gesamten Totzeit des Systems  $T_{TZ}$  abhängig.

Für die Einstellregeln nach Ziegler Nichols gilt für das System LL:

Regler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P-Regler	$K_{P,P} = 1 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$		
PI-Regler	$K_{PI,P} = 0.9 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$	$T_{PI,I} = 3.33 \cdot T_{TZ}$	
PID-Regler	$K_{PID,P} = 1.2 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$	$T_{PID,I} = 2 \cdot T_{TZ}$	$T_{PID,D} = 0.5 \cdot T_{TZ}$

Tab. 7.4 Einstellregeln nach Ziegler/Nichols mit Step Response Method

## 7.5 Regelung des Systems Längslüftung mit Einstellungen nach Ziegler/Nichols

Im Folgenden wird die Sprungantwort-Methode von Ziegler/Nichols auf das System Längslüftung am Beispieeltunnel Gotschna angewendet.

### 7.5.1 Regelungsziel beim System Längslüftung

In Kapitel 6.4.1 wurde das Regelungsziel des Systems Längslüftung definiert.

Beim System mit Längslüftung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$  geregelt.

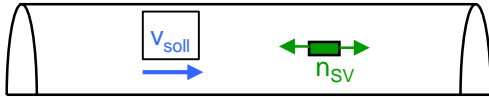


Abb. 7.12 Regelungsziel beim System Längslüftung: Regelung auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit

Je nachdem, ob es sich um Richtungsverkehr mit oder ohne Stau oder um Gegenverkehr handelt, wird gemäss [1] auf eine andere Strömungsgeschwindigkeit geregelt:

Regelungsziel bei Richtungsverkehr ohne Stau gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 3 \text{ [m/s]} \quad 7-45$$

Mit:

$$v_{\text{soll}} \quad \text{Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel} \quad \text{[m/s]}$$

Regelungsziel bei Richtungsverkehr mit Stau oder Gegenverkehr gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 1 \text{ [m/s]} \quad 7-46$$

### 7.5.2 Regelungskreis des Systems Längslüftung

Abb. 7.13 zeigt den Regelkreis mit PI-Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

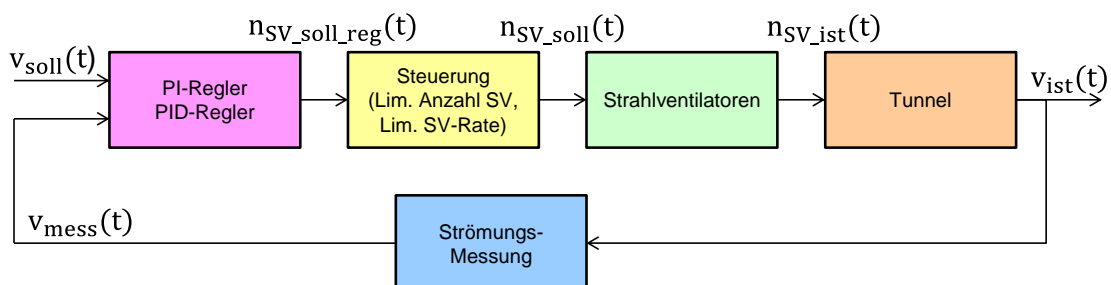


Abb. 7.13 Regelkreis: PI- und PID-Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 7.5.3 Herleitung der Regelparameter für die PI- und PID-Regelung

Um die Einstellparameter nach Ziegler/Nichols herzuleiten muss die Sprungantwort des gesamten Regelkreises einem Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit angenähert werden. In einem realen Tunnel kann diese Sprungantwort gemessen werden. Bei den einzelnen Modellen des Regelkreises müssen die Totzeiten einzeln hergeleitet werden.

Folgende Totzeiten treten auf:

- Totzeit durch die Rampenantwort der limitierten SV-Einschaltrate.
- Totzeit durch die Dynamik der Strahlventilatoren
- Totzeit durch die Filterung der Strömungsmessung

#### Totzeit durch limitierte SV-Einschaltrampe

Die Sprungantwort der limitierten SV-Einschaltrate (Rampenantwort) und die daraus resultierende Totzeit wurde in Kapitel 2.5.6 hergeleitet.

Abb. 7.14 zeigt die limitierte SV-Einschaltrampe (grün) und die resultierende Sprungantwort (Rampenantwort) für System als PT1 (rot).

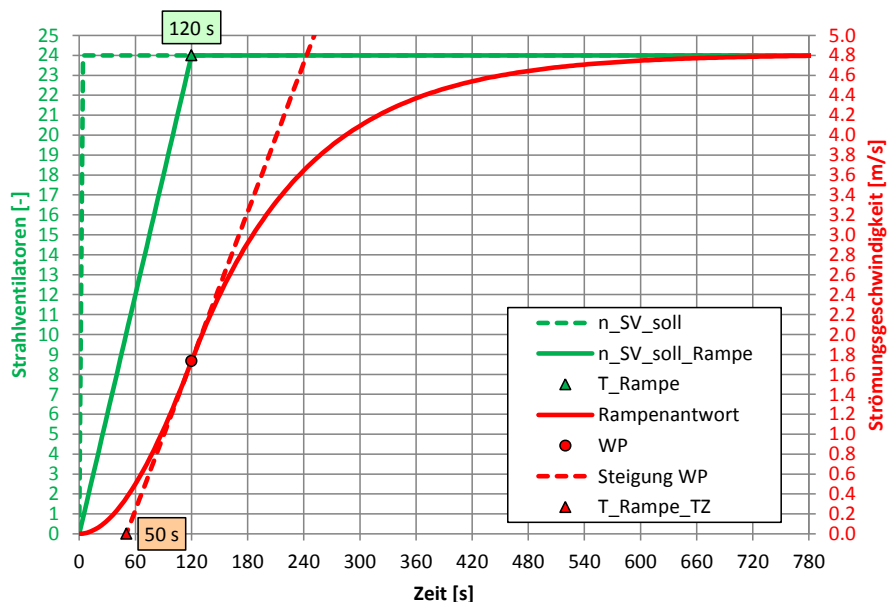


Abb. 7.14 SV-Rampe (grün) und Rampenantwort für System als PT1 (rot) (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $n_{SV} = 24$ )

Für die maximale Totzeit durch die Rampenantwort  $T_{R,TZ}$  gilt:

$$T_{R,TZ,max} \approx 50 \text{ s} \tag{7-47}$$

#### Totzeit der Strahlventilatorndynamik

Die Totzeit der Strahlventilatorndynamik wurde in Kapitel 2.2.1 hergeleitet. Sie wird näherungsweise der Zeitkonstante der Strahlventilatoren gleichgesetzt:

$$T_{SV,TZ} = \tau_{SV} = 5 \text{ [s]} \tag{7-48}$$

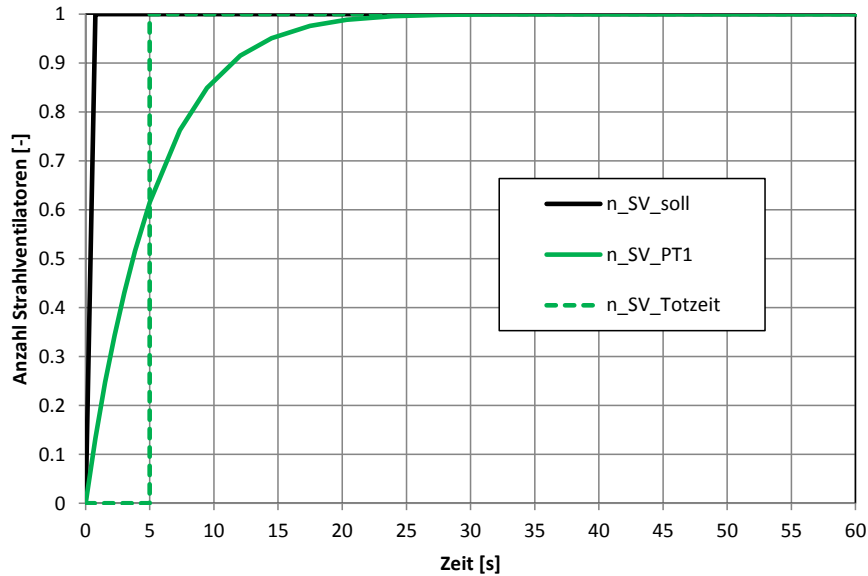


Abb. 7.15 Sprungantwort der Strahlventilatoren als Tiefpass 1. Ordnung und als Totzeit

**Totzeit der Filterung der Strömungsmessung**

Die Totzeit der Filterung der Strömungsmessung wurde in Kapitel 2.4 hergeleitet. Sie wird näherungsweise der Zeitkonstante der Strömungsmessung gleichgesetzt:

$$T_{\text{mess\_TZ}} = \tau_{\text{mess}} = 10 \text{ [s]} \tag{7-49}$$

**Summe aller Totzeiten**

Als gesamte Totzeit wird somit die Summe der Totzeiten des Strahlventilators  $T_{\text{SV\_TZ}}$ , der Messung  $T_{\text{mess\_TZ}}$  und der maximalen Totzeit durch die Rampenantwort  $T_{\text{R\_TZ\_max}}$  genommen.

$$T_{\text{TZ}} = T_{\text{SV\_TZ}} + T_{\text{mess\_TZ}} + T_{\text{R\_TZ\_max}} \approx 65 \text{ s} \tag{7-50}$$

**Einstellparameter nach Ziegler/Nichols**

Tab. 7.5 zeigt die Einstellregeln nach Ziegler Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe:

Regler	$K_p$	$T_i$	$K_i$	$T_d$	$K_d$
P-Regler	9.42 [s/m]				
PI-Regler	8.48 [s/m]	217.90 [s]	0.039 [1/m]		
PID-Regler	11.30 [s/m]	130.87 [s]	0.086 [1/m]	32.72 [s]	369.81 [s <sup>2</sup> /m]

Tab. 7.5 Einstellregeln nach Ziegler/Nichols mit Step Response Method unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe (mit  $T_{\text{SV\_TZ}} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{\text{mess\_TZ}} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{\text{R\_TZ\_max}} = 50 \text{ s}$ )

**Zeitkonstante für den Anti-Windup**

Für den Anti-Windup wurde folgende Zeitkonstante gewählt:

$$T_{\text{PID\_aw}} = T_{\text{PI\_aw}} = 5 \text{ s} \tag{7-51}$$

### 7.5.4 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI- und PID-Regler

Abb. 7.16 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

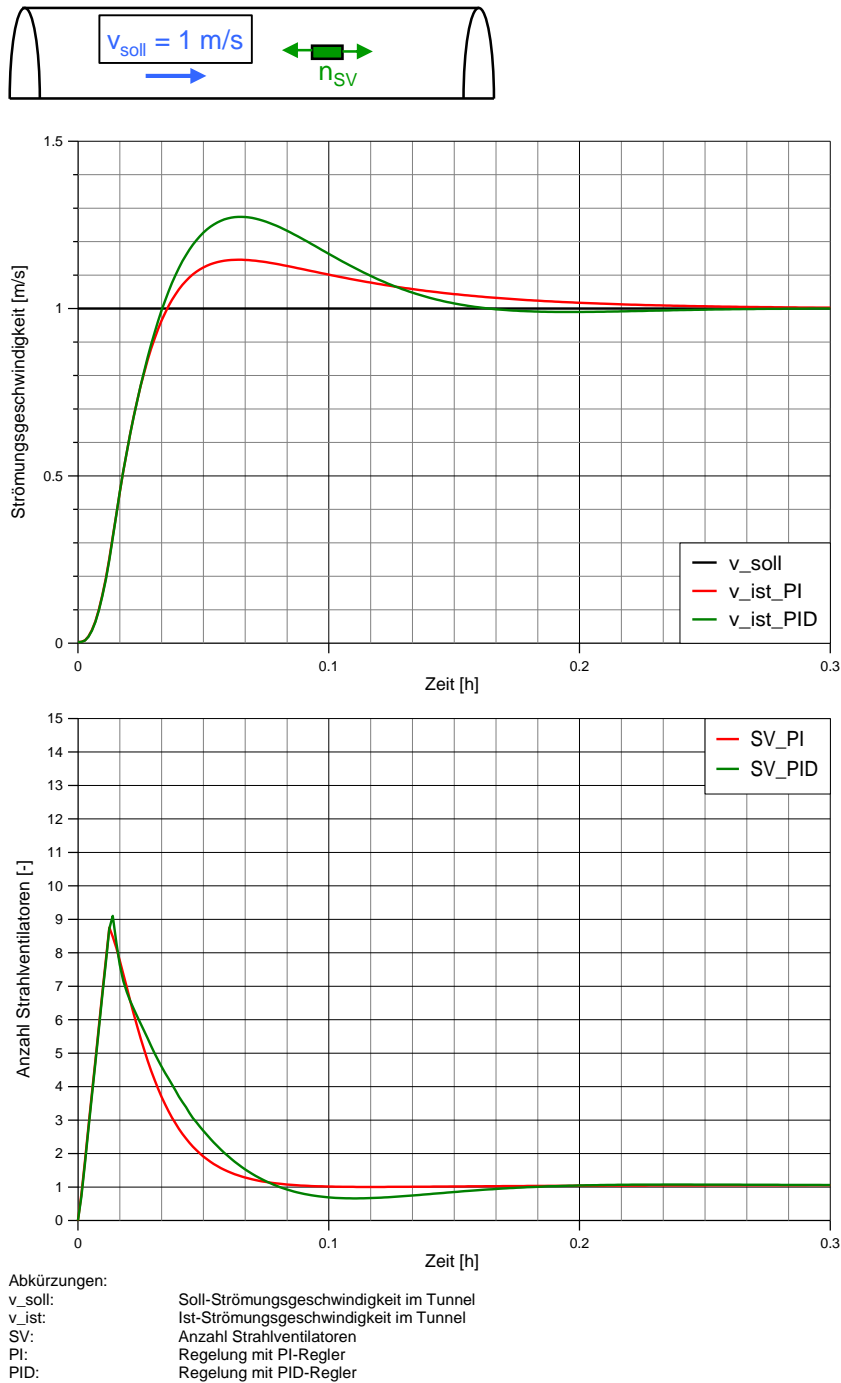


Abb. 7.16 Regelung auf 1 m/s mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50 \text{ s}$ )

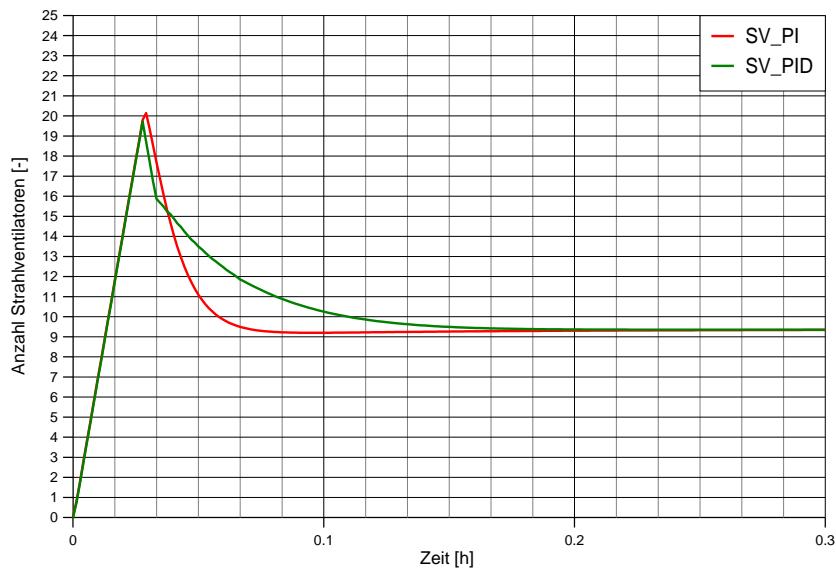
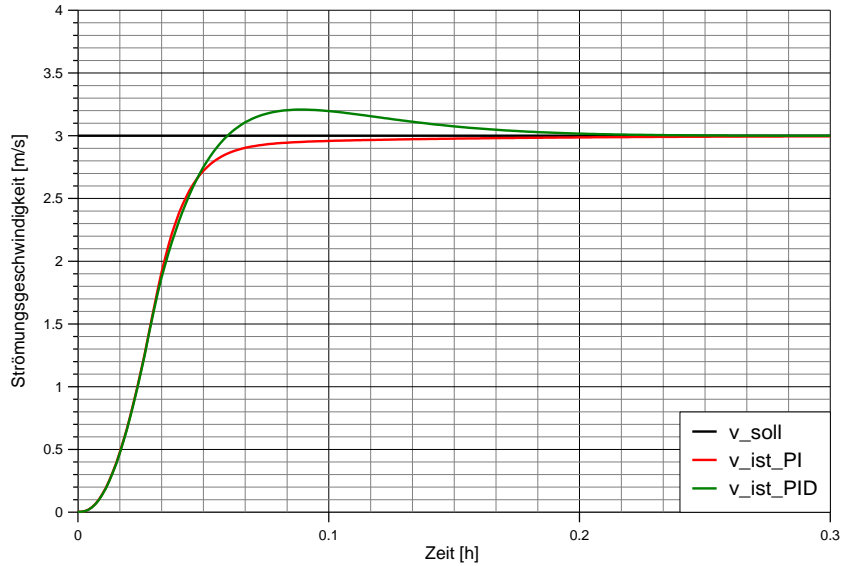
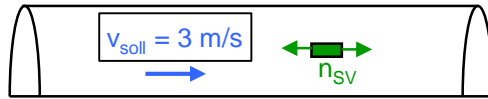
Tab. 7.6 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI- und PID-Regelung.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI	< 2 min	$\approx 0.2$ m/s $\approx 20\%$	< 5 min
PID	< 2 min	$\approx 0.3$ m/s $\approx 30\%$	< 6 min

Tab. 7.6 *Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI- und PID-Regelung*

### 7.5.5 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI- und PID-Regler

Abb. 7.17 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.



Abkürzungen:  
 v\_soll: Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 v\_ist: Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 SV: Anzahl Strahlventilatoren  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 PID: Regelung mit PID-Regler

Abb. 7.17 Regelung auf 3 m/s mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5\text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10\text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50\text{ s}$ )

Tab. 7.7 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI- und PID-Regelung.

Regelung 3 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI	< 3 min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	< 3 min
PID	< 3 min	$\approx 0.2$ m/s $\approx 6\%$	< 3 min

Tab. 7.7 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI- und PID-Regelung

### 7.5.6 Schlussfolgerungen Regelung des Systems LL mit PI-/PID-Regelung

Der PI-Regler hat eigentlich nur Vorteile gegenüber der PID-Regelung:

- Kleinere Überschwingung
- Nur 2 Regelparameter

## 7.6 Regelung des Systems mit Absaugung mit Einstellungen nach Ziegler/Nichols

### 7.6.1 Regelungsziel bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS

Bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr wird bei Systemen mit Absaugung auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

In Kapitel 6.4.2 wurde das Regelungsziel des Systems ABS bei Symmetrischer Regelung definiert.

Es gilt:

$$v_{L\_soll} = \frac{v_{L\_mess} - v_{R\_mess}}{2} \quad 7-52$$

Mit:

$v_{L\_soll}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit des linken Lüftungsabschnitts	[m/s]
$v_{L\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit links	[m/s]
$v_{R\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit rechts	[m/s]

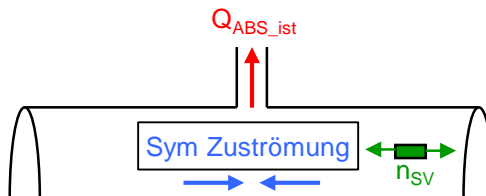


Abb. 7.18 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr: Symmetrische Anströmung zur Absaugstelle

### 7.6.2 Regelungsziel bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit des Systems ABS

Bei Richtungsverkehr ohne Stau wird bei Systemen mit Absaugung die Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts von der Absaugstelle in Verkehrsrichtung auf einen Sollwert geregelt.

In Kapitel 6.4.3 wurde das Regelungsziel des Systems ABS bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit definiert

Es gilt:

$$v_{L\_soll} = 3 \text{ [m/s]} \quad 7-53$$

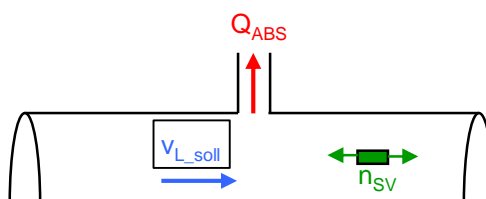


Abb. 7.19 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr ohne Stau: Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

### 7.6.3 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung

Abb. 7.20 zeigt den Regelkreis für symmetrische Regelung mit PI-Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

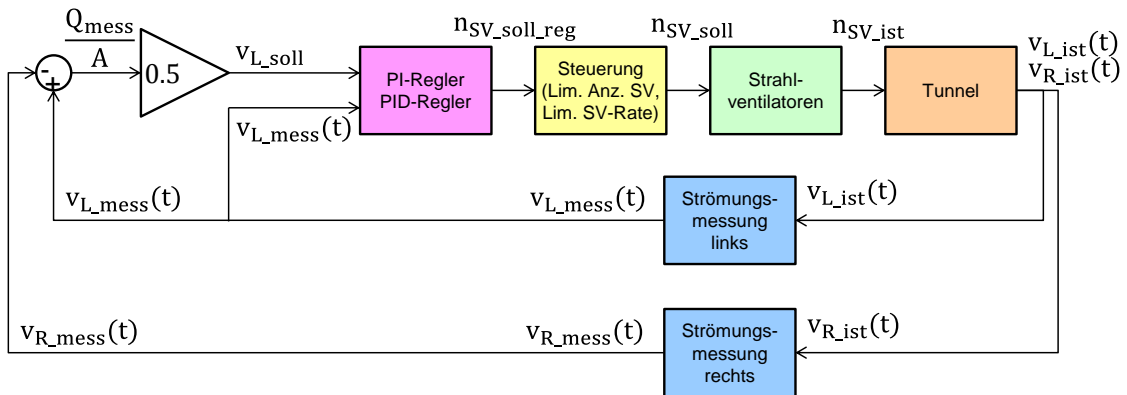


Abb. 7.20 Regelkreis für symmetrische Regelung: PI- und PID-Regler, Steuerung (Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 7.6.4 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$

Abb. 7.21 zeigt den Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit mit PI-Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

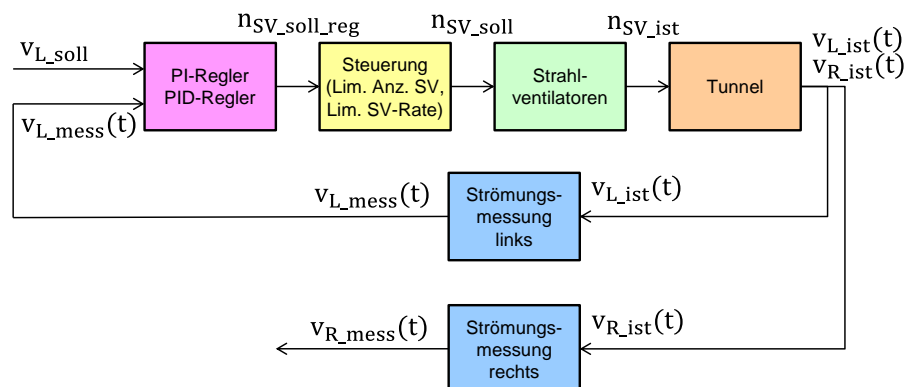


Abb. 7.21 Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit: PI- und PID-Regler, Steuerung (Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 7.6.5 Herleitung der Regelparameter für die PI- und PID-Regelung

Für das System mit Absaugung können die gleichen Regelparameter wie für das System Längslüftung verwendet werden. Die Totzeiten werden vom System Längslüftung übernommen.

Für die maximale Totzeit durch die Rampenantwort  $T_{R,TZ}$  gilt:

$$T_{R,TZ,max} \approx 50 \text{ s} \quad 7-54$$

Totzeit für die Verzögerung der Strahlventilatoren  $T_{SV,TZ}$ :

$$T_{SV,TZ} = 5 \text{ s} \quad 7-55$$

Totzeit für die Verzögerung der Messung  $T_{\text{mess\_TZ}}$ :

$$T_{\text{mess\_TZ}} = 10 \text{ s} \quad 7-56$$

Für die gesamte Totzeit ergibt sich:

$$T_{\text{TZ}} = T_{\text{SV\_TZ}} + T_{\text{mess\_TZ}} + T_{\text{R\_TZ\_max}} \approx 65 \text{ s} \quad 7-57$$

Tab. 7.8 zeigt die Einstellregeln nach Ziegler Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe:

Regler	$K_p$	$T_i$	$K_i$	$T_d$	$K_d$
P-Regler	9.42 [s/m]				
PI-Regler	8.48 [s/m]	217.90 [s]	0.039 [1/m]		
PID-Regler	11.30 [s/m]	130.87 [s]	0.086 [1/m]	32.72 [s]	369.81 [s <sup>2</sup> /m]

Tab. 7.8 *Einstellregeln nach Ziegler/Nichols mit Step Response Method unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe (mit  $T_{\text{SV\_TZ}} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{\text{mess\_TZ}} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{\text{R\_TZ\_max}} = 50 \text{ s}$ )*

### 7.6.6 Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 7.22 zeigt die Simulation der symmetrischen Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

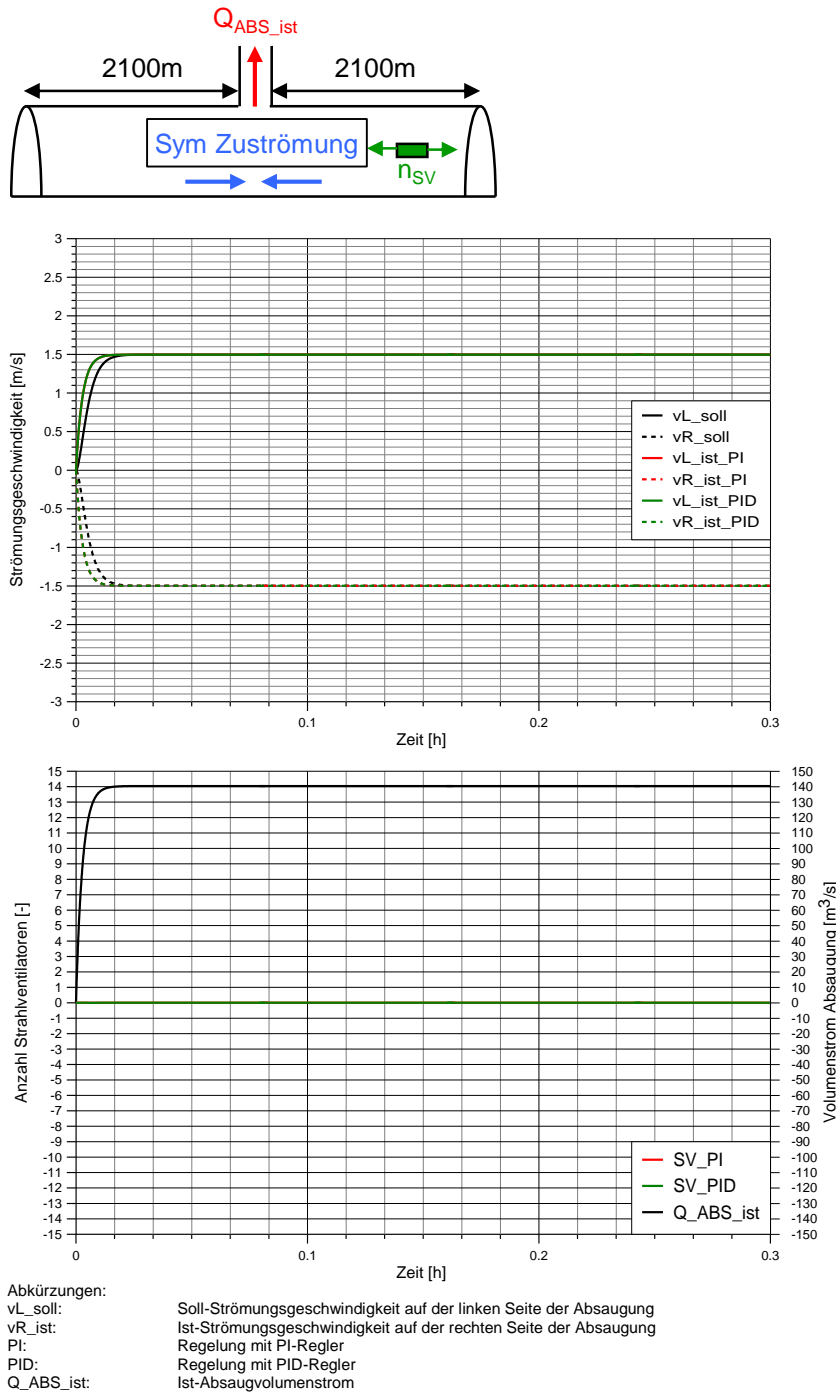


Abb. 7.22 Symmetrische Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5\text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10\text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50\text{ s}$ )

Die Kurven der verschiedenen Regelungen liegen übereinander. Bei symmetrischer Regelung und Absaugung in der Mitte hat die Regelung „nichts zu tun“. Da keine asymmetrischen Stördrücke auftreten, werden keine Strahlventilatoren benötigt.

Tab. 7.9 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit

der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regelung.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	< 1 min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	< 1 min
PID	< 1 min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	< 1 min

*Tab. 7.9 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regelung*

### 7.6.7 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 7.23 zeigt die Simulation der symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

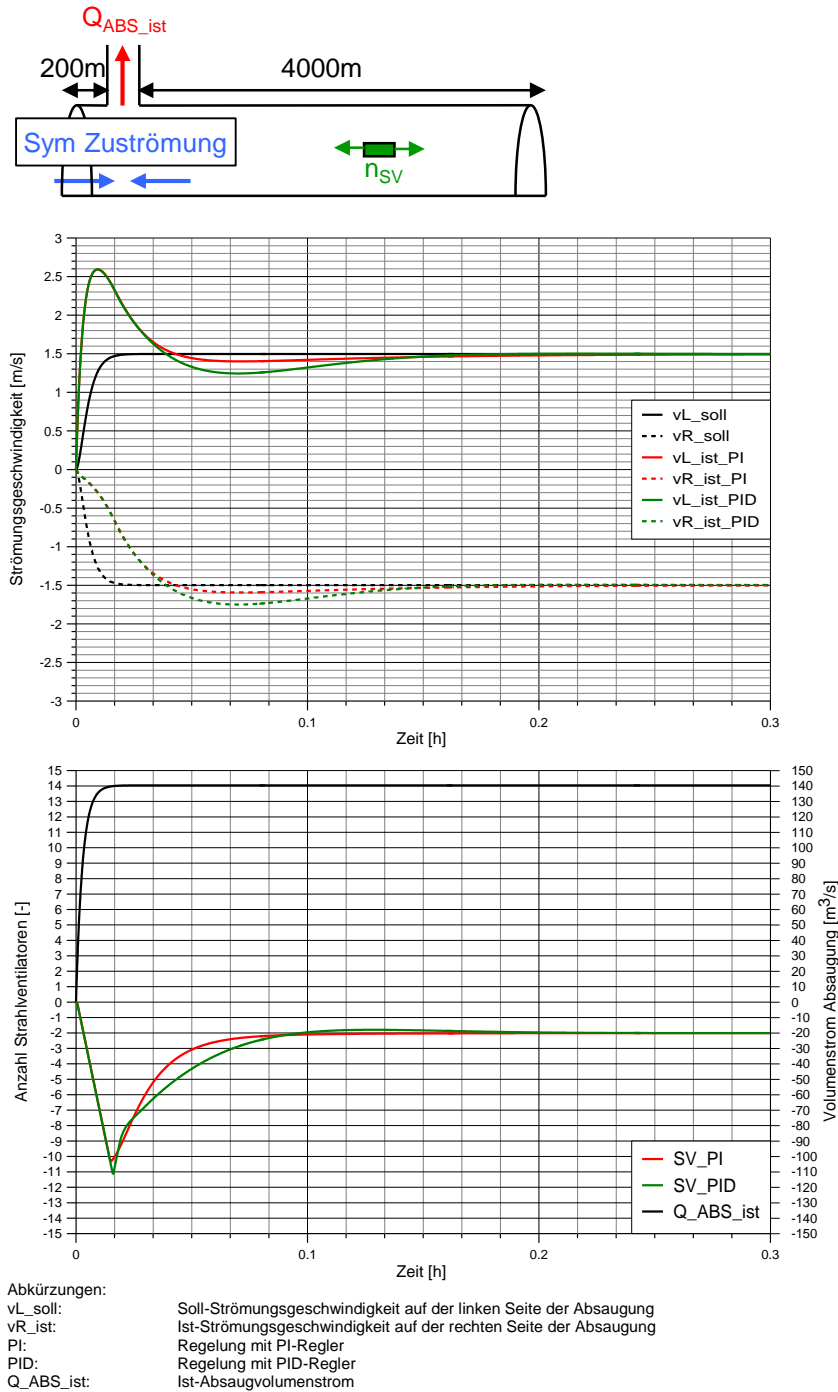


Abb. 7.23 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5\text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10\text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50\text{ s}$ )

Tab. 7.10 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regelung.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	< 0.5 min	≈ 1.1 m/s ≈ 75%	≈ 2 min
PID	< 0.5 min	≈ 1.1 m/s ≈ 75%	≈ 6 min

*Tab. 7.10 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regelung*

### 7.6.8 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 7.24 zeigt die Simulation der symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

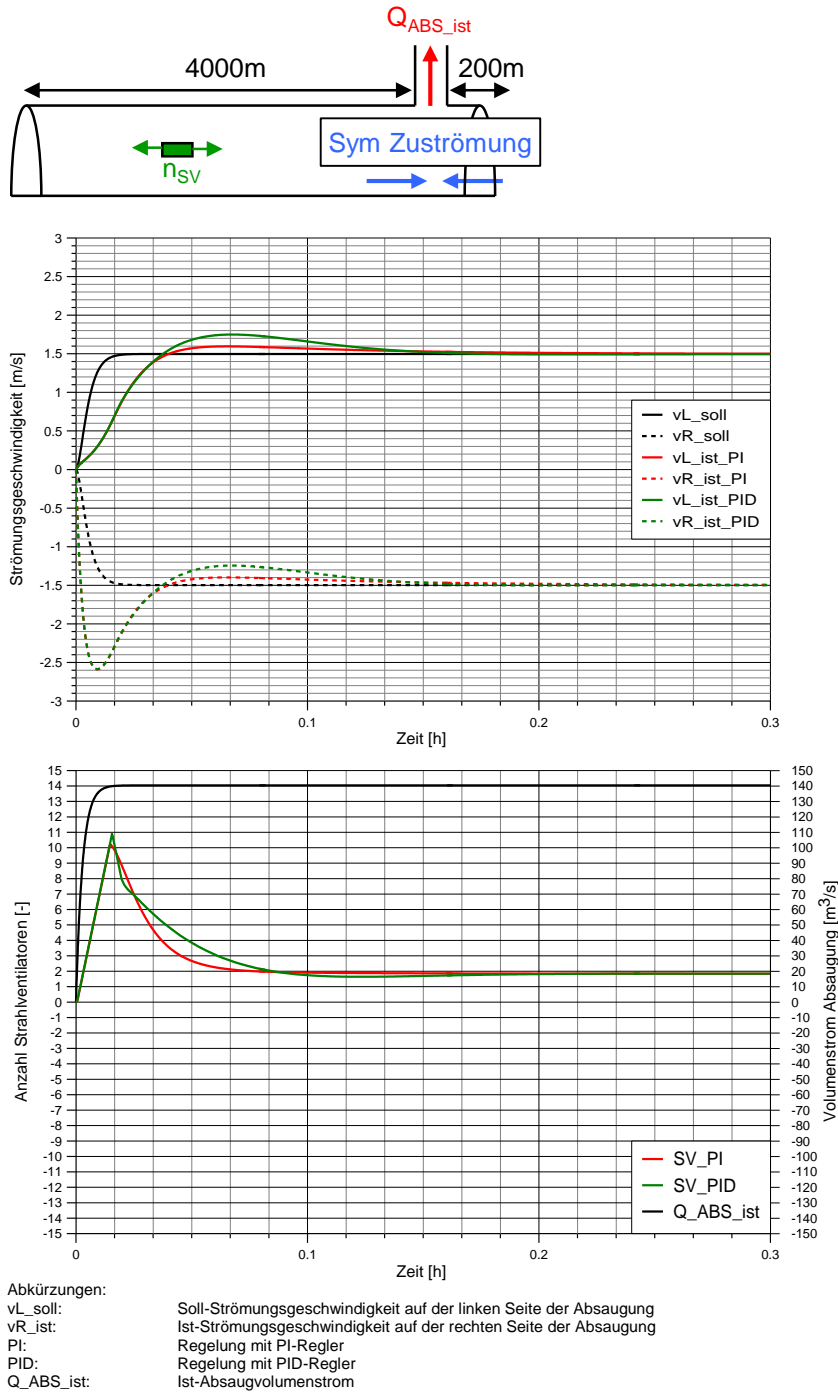


Abb. 7.24 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5\text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10\text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50\text{ s}$ )

Tab. 7.11 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regelung.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	≈ 2 min	≈ 0.1 m/s < 10%	≈ 2 min
PID	≈ 2 min	≈ 0.25 m/s < 20%	≈ 5 min

*Tab. 7.11 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regelung*

### 7.6.9 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 7.25 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

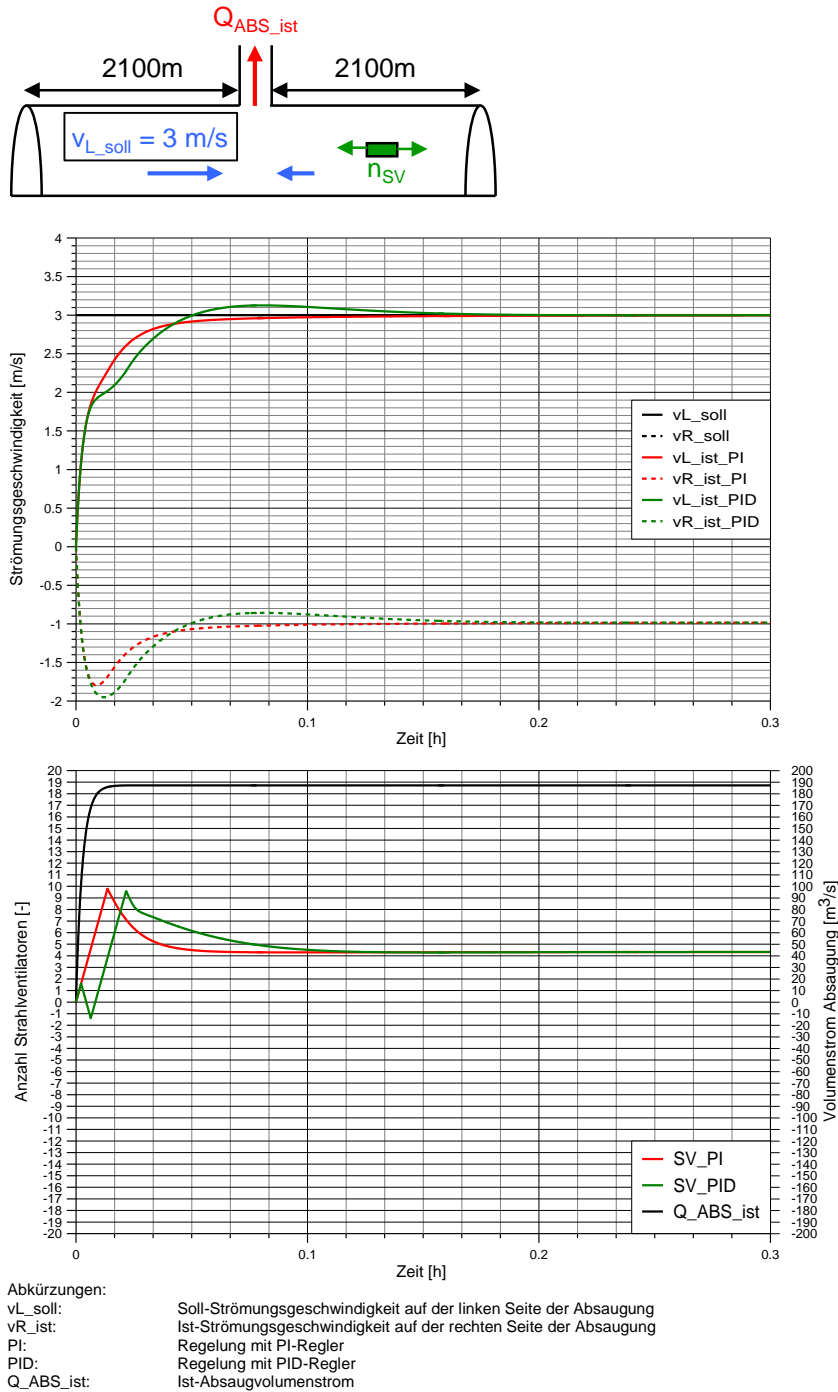


Abb. 7.25 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50 \text{ s}$ )

Tab. 7.12 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regelung.

Regelung $v_{L\_soll} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0 \text{ m/s}$ $\approx 0\%$	$\approx 2 \text{ min}$
PID	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.1 \text{ m/s}$ $\approx 5\%$	$\approx 2 \text{ min}$

*Tab. 7.12 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit PI- und PID-Regelung*

Bei Absaugung in der Mitte und Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit  $v_L$ , sind die Regelungen von PI- und PID-Regler ähnlich gut.

### 7.6.10 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 7.26 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

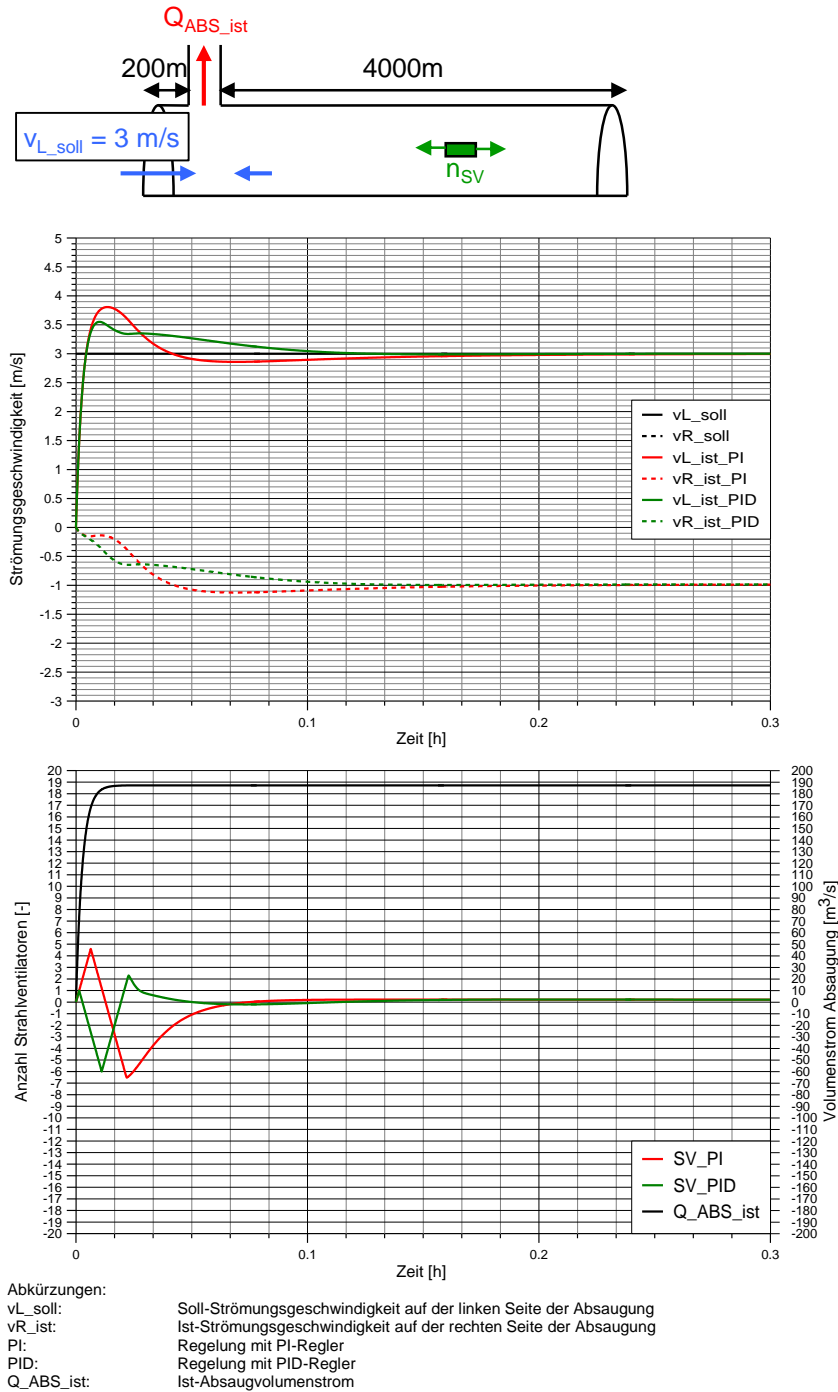


Abb. 7.26 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50 \text{ s}$ )

Tab. 7.13 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regelung.

Regelung $v_{L\_soll} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	< 0.5 min	$\approx 0.8 \text{ m/s}$ $\approx 25\%$	$\approx 2 \text{ min}$
PID	< 0.5 min	$\approx 0.6 \text{ m/s}$ $\approx 20\%$	$\approx 3 \text{ min}$

Tab. 7.13 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit PI- und PID-Regelung

### 7.6.11 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 7.27 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols.

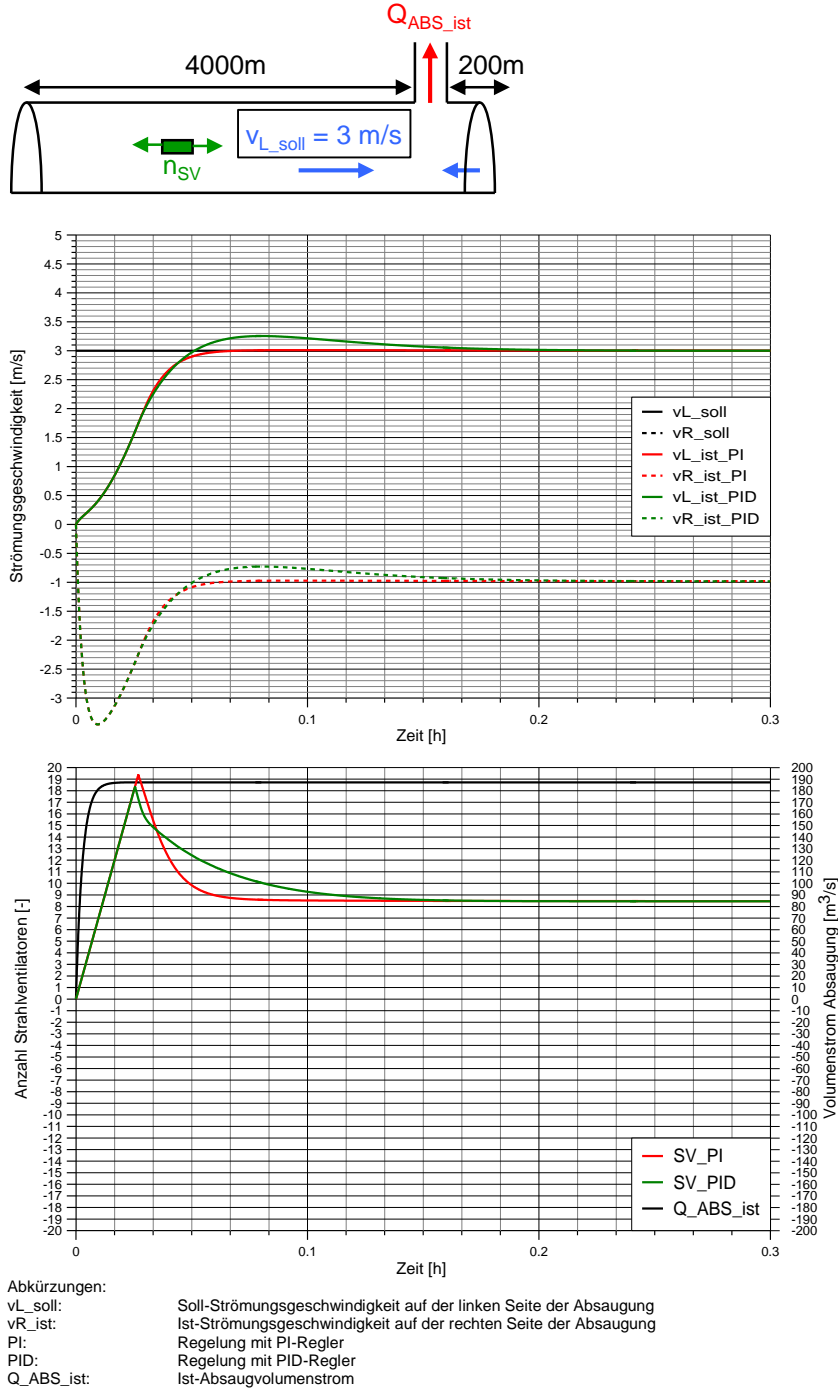


Abb. 7.27 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols (mit  $T_{SV\_TZ} = 5 \text{ s}$ ,  $T_{mess\_TZ} = 10 \text{ s}$ ,  $T_{R\_TZ\_max} = 50 \text{ s}$ )

Tab. 7.14 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regelung.

Regelung $v_{L\_soll} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 0 \text{ m/s}$ $< 0\%$	$\approx 2.5 \text{ min}$
PID	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 0.3 \text{ m/s}$ $< 10\%$	$\approx 2.5 \text{ min}$

Tab. 7.14 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit PI- und PID-Regelung

### 7.6.12 Schlussfolgerungen Regelung des Systems mit Absaugung mit PI-/PID-Regelung

Die symmetrische Regelung beim System mit Absaugung hängt entscheidend vom Absaugort ab. Bei Absaugung in der Mitte hat die Regelung wenig bis nichts zu tun, da keine asymmetrischen Stördrücke auftreten. Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die Asymmetrie ausgleichen.

Bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit auf 3 m/s sind die Regelungen von PI- und PID-Regler ähnlich gut, wobei der PI-Regler minimal besser regelt.

Auch beim System mit Absaugung hat der PI-Regler eigentlich nur Vorteile gegenüber der PID-Regelung:

- Kleinere Überschwingung
- Nur 2 Regelparameter

## 8 Schrittweise Berechnung der Anzahl SV (Modellbasierte Regelung)

In konstanten Zeitschritten (Abtastzeit  $t_S$ ) werden die theoretische Soll-Anzahl der SV  $n_{SV\_soll\_theoretisch\_k} = f(v_{soll\_k})$  und die theoretische Ist-Anzahl der SV  $n_{SV\_ist\_theoretisch\_k} = f(v_{mess\_k})$  berechnet. Die theoretische SV-Differenz  $\Delta n_{SV\_soll\_k}$  (positiv oder negativ) wird dann entsprechend zu der aktuellen Anzahl SV zu- oder weggeschaltet.

$$n_{SV\_soll\_k} = n_{SV\_soll\_k-1} + \Delta n_{SV\_soll\_k} \quad 8-1$$

Mit:

$n_{SV\_soll\_k}$	Soll-Anzahl der SV beim Zeitschritt k	[-]
$n_{SV\_soll\_k-1}$	Soll-Anzahl der SV beim Zeitschritt k-1	[-]
$\Delta n_{SV\_soll\_k}$	Theoretische Soll-Differenz der SV beim Zeitschritt k	[-]

### 8.1 Regelung des Systems Längslüftung mit „schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“

#### 8.1.1 Herleitung der Anzahl zu schaltenden SV beim System LL

Für den Druckverlust über den gesamten Tunnel ergibt sich im stationären Zustand vereinfacht:

$$\sum dp_T = 0 = - \underbrace{\frac{1}{2} \rho \left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}_{\Delta p_{Geom+Fz}} \cdot v \cdot |v| + \underbrace{\frac{\rho A_{SV} v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T}}_{\Delta p_{SV}} \cdot n_{SV} \quad 8-2$$

Mit:

$\Delta p_T$	Summe aller Drücke im Tunnel	[Pa]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\kappa_P$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals	[-]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]
$n_{Fz}$	Anzahl Fahrzeuge	[-]
$c_w$	Widerstandskoeffizient der Fahrzeuge	[-]
$A_{Fz}$	Querschnittsfläche der Fahrzeuge	[m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$\Delta p_{Geom+Fz}$	Druck infolge Reibungsverlust durch Geometrie und Fahrzeuge	[Pa]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$n_{SV}$	Anzahl laufende Strahlventilatoren	[-]
$\Delta p_{SV}$	Druckerzeugung von $n_{SV}$ Strahlventilatoren	[Pa]

Wobei die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  von links nach rechts (L→R) als positiv definiert ist:

In Kapitel 2.5 wurden die Konstanten  $a_T$  und  $b_T$  definiert:

$$a_T = \frac{\left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right)}{2 \cdot L} \quad 8-3$$

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \quad 8-4$$

Mit:

$a_T$	Widerstandskonstante des Tunnels	[1/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]

Dadurch lässt sich die Druckgleichung umformen zu:

$$0 = -a_T \cdot v \cdot |v| + b_T \cdot n_{SV} \quad 8-5$$

Nach der Anzahl Strahlventilatoren aufgelöst:

$$n_{SV} = \frac{a_T}{b_T} \cdot v \cdot |v| \quad 8-6$$

Für jeden Zeitschritt  $k$  wird folgendes berechnet:

$$n_{SV\_soll\_theoretisch\_k} = \frac{a_T}{b_T} \cdot v_{soll\_k} \cdot |v_{soll\_k}| \quad 8-7$$

Mit:

$n_{SV\_soll\_theoretisch\_k}$	Theoretische Soll-Anzahl der SV beim Zeitschritt $k$	[-]
$v_{soll\_k}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit beim Zeitschritt $k$	[m/s]

$$n_{SV\_ist\_theoretisch\_k} = \frac{a_T}{b_T} \cdot v_{mess\_k} \cdot |v_{mess\_k}| \quad 8-8$$

Mit:

$n_{SV\_ist\_theoretisch\_k}$	Theoretische Ist-Anzahl der SV beim Zeitschritt $k$	[-]
$v_{mess\_k}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit beim Zeitschritt $k$	[m/s]

Für die theoretische Soll-Differenz der SV  $\Delta n_{SV\_soll\_k}$  beim Zeitschritt  $k$  gilt:

$$\Delta n_{SV\_soll\_k} = n_{SV\_soll\_theoretisch\_k} - n_{SV\_ist\_theoretisch\_k} \quad 8-9$$

Mit:

$\Delta n_{SV\_soll\_k}$	Theoretische Soll-Differenz der SV beim Zeitschritt $k$	[-]
--------------------------	---	-----

Und somit gilt:

$$\Delta n_{SV\_soll\_k} = \frac{a_T}{b_T} \cdot (v_{soll\_k} \cdot |v_{soll\_k}| - v_{mess\_k} \cdot |v_{mess\_k}|) \quad 8-10$$

Für jeden Zeitschritt  $k$  wird die berechnete Anzahl Strahlventilatoren  $\Delta n_{SV\_soll\_k}$  zu der aktuellen Anzahl Strahlventilatoren des letzten Zeitschrittes  $k-1$  zu- oder abgeschaltet.

$$n_{SV\_soll\_k} = n_{SV\_soll\_k-1} + \Delta n_{SV\_soll\_k} \quad 8-11$$

Nach jedem Zeitschritt wird  $n_{SV\_soll}$  neu berechnet.

Die Abtastzeit  $t_s$  ist der einzige Einstellparameter dieser Regelung. Für die Abtastzeit gilt:

$$t_s = t_k - t_{k-1} \quad 8-12$$

Mit:

$t_s$	Abtastzeit	[s]
$t_k$	Zeit beim Zeitschritt k	[s]
$t_{k-1}$	Zeit beim Zeitschritt k-1	[s]

Für die Regelung des Systems Längslüftung mit Schrittweiser Berechnung der Strahlventilatoren werden folgende Abtastzeiten untersucht:

$$t_s = \{60 [s], 90 [s], 120 [s]\} \quad 8-13$$

Mit:

$t_s$	Abtastzeit	[s]
-------	------------	-----

### 8.1.2 Regelungsziel beim System Längslüftung

In Kapitel 6.4.1 wurde das Regelungsziel des Systems Längslüftung definiert.

Beim System mit Längslüftung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{soll}$  geregelt.

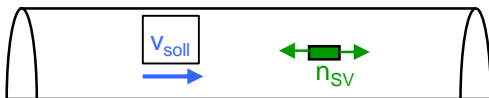


Abb. 8.1 Regelungsziel beim System Längslüftung: Regelung auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit

Je nachdem, ob es sich um Richtungsverkehr mit oder ohne Stau oder um Gegenverkehr handelt, wird gemäss [1] auf eine andere Strömungsgeschwindigkeit geregelt:

Regelungsziel bei Richtungsverkehr ohne Stau gemäss [1]:

$$v_{soll} = 3 [m/s] \quad 8-14$$

Mit:

$v_{soll}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
------------	---	-------

Regelungsziel bei Richtungsverkehr mit Stau oder Gegenverkehr gemäss [1]:

$$v_{soll} = 1 [m/s] \quad 8-15$$

### 8.1.3 Regelungskreis des Systems Längslüftung

Abb. 8.2 zeigt den Regelkreis mit Modellbasiertem Regler, limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

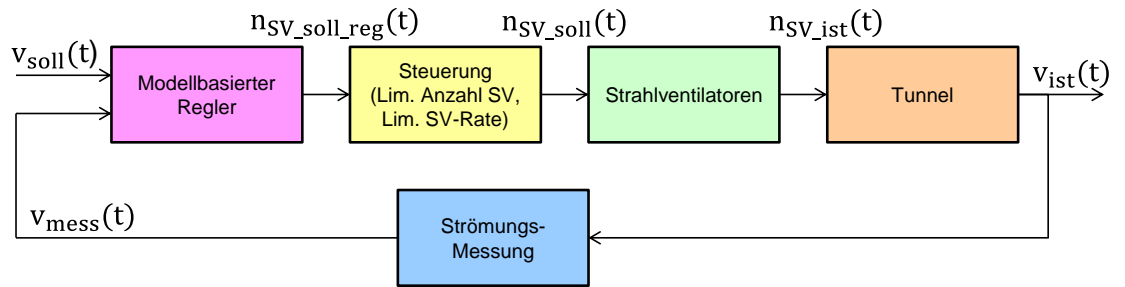


Abb. 8.2 Regelkreis: Modellbasierter Regler, limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 8.1.4 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit schrittweiser Berechnung der Anzahl SV

Abb. 8.3 zeigt die Regelung des nicht-linearen Systems auf 1 m/s mit verschiedenen Abtastzeiten.

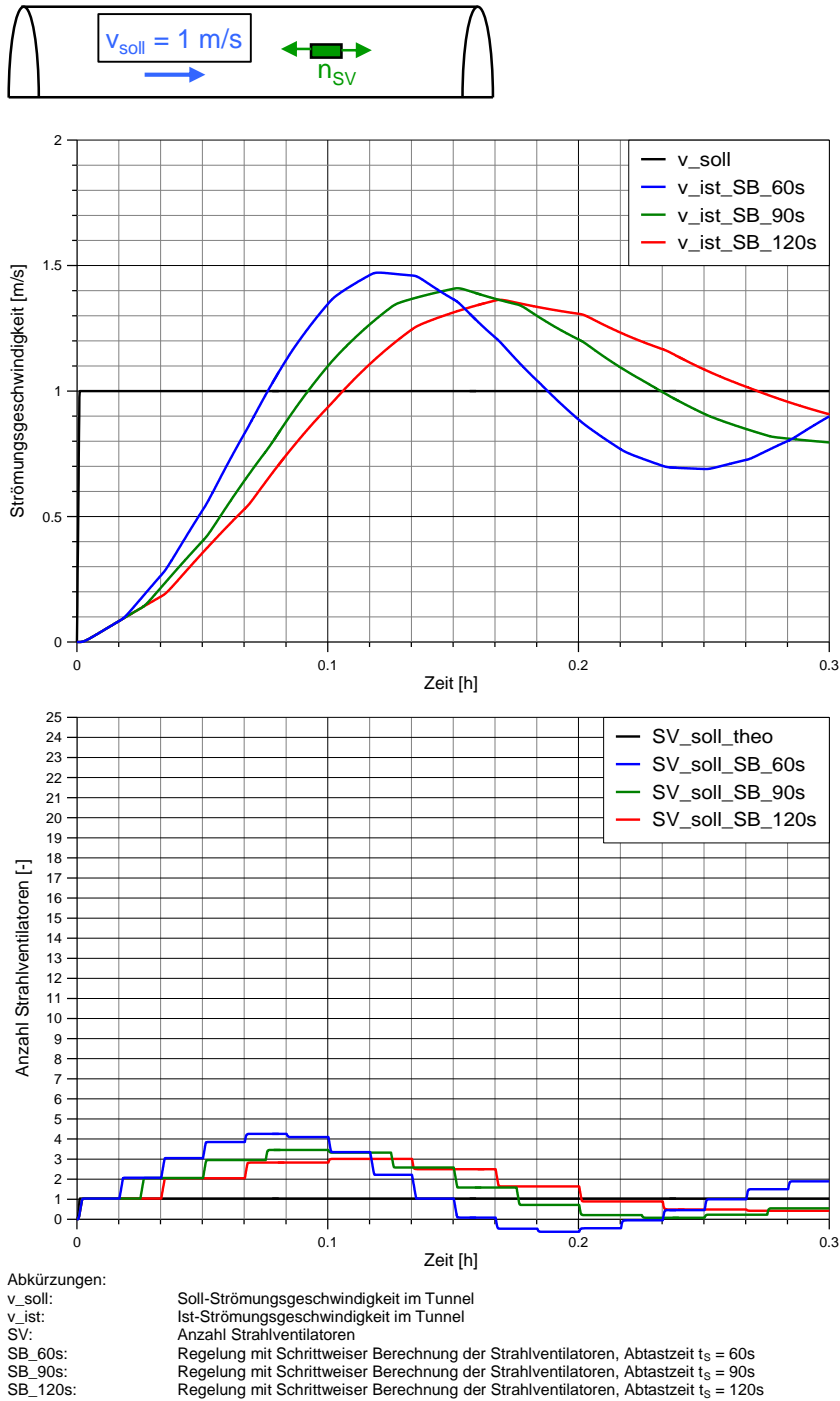


Abb. 8.3 Regelung auf 1 m/s mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.1 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit Modelbasierter Regelung.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
Schrittweise Berechnung der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	< 4.5 min	$\approx 0.5$ m/s $\approx 50\%$	> 18 min
Schrittweise Berechnung der SV (Abtastzeit $t_s=90s$ )	< 5 min	$\approx 0.4$ m/s $\approx 40\%$	> 18 min
Schrittweise Berechnung der SV (Abtastzeit $t_s=120s$ )	< 5.5 min	$\approx 0.35$ m/s $\approx 35\%$	> 18 min

Tab. 8.1 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“

### 8.1.5 Schlussfolgerungen Regelung des Systems Längslüftung mit Schrittweiser Berechnung der SV

Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit dar:

- Bei grösseren Abtastzeiten ist die Überschwingung kleiner und das System schwingt schneller ein. Dafür dauert die Anstiegszeit länger
- Bei kleineren Abtastzeiten ist die Anstiegszeit kürzer. Dafür ist die Überschwingung grösser und das System schwingt länger.

## 8.2 Regelung des Systems mit Absaugung mit „schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“

### 8.2.1 Herleitung der Anzahl zu schaltenden SV beim System ABS

In Kapitel 2.6.4 wurde die Differentialgleichung für einen Tunnel mit konstanter Absaugung und stationärem Zustand hergeleitet:

$$0 = -a_{TL} \cdot v_L \cdot |v_L| - a_{TR} \cdot v_R \cdot |v_R| + b_T \cdot n_{SV,ist} \quad 8-16$$

Mit:

$a_{TL}$	Widerstandskonstante des linken Lüftungsabschnitts	[1/m]
$a_{TR}$	Widerstandskonstante des rechten Lüftungsabschnitts	[1/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$v_L$	Strömungsgeschwindigkeit links von der Absaugung	[m/s]
$v_R$	Strömungsgeschwindigkeit rechts von der Absaugung	[m/s]

Wobei:

$$v_R = v_L - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \quad 8-17$$

Mit:

$Q_{ABS}$	Absaugvolumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]

Mit den folgenden Konstanten:

$$a_{TL} = \frac{\left( \kappa_{PL} + X_L \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \right)}{2 \cdot L} \quad 8-18$$

$$a_{TR} = \frac{\left( \kappa_{PR} + (1 - X_L) \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \frac{n_{Fz} c_w A_{Fz}}{A_T} \right) \right)}{2 \cdot L} \quad 8-19$$

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} \quad 8-20$$

Mit:

$\kappa_P$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals	[-]
$X_L$	Längenanteil des linken Lüftungsabschnitts	[-]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]
$n_{Fz}$	Anzahl Fahrzeuge	[-]
$c_w$	Widerstandskoeffizient der Fahrzeuge	[-]
$A_{Fz}$	Querschnittsfläche der Fahrzeuge	[m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]

Und mit:

$$X_L = \frac{L_L}{L} \quad 8-21$$

Nach Umformung der Differentialgleichung ergibt sich für die Anzahl SV bei stationärem Zustand:

$$n_{SV\_ist} = \frac{a_{TL}}{b_T} \cdot v_L \cdot |v_L| + \frac{a_{TR}}{b_T} \cdot v_R \cdot |v_R| \quad 8-22$$

Für die Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV wird nun für jeden Zeitschritt k folgendes berechnet:

$$n_{SV\_soll\_theoretisch\_k} = \frac{a_{TL}}{b_T} \cdot v_{L\_soll\_k} \cdot |v_{L\_soll\_k}| + \frac{a_{TR}}{b_T} \cdot v_{R\_soll\_k} \cdot |v_{R\_soll\_k}| \quad 8-23$$

Mit:

$n_{SV\_soll\_theoretisch\_k}$	Theoretische Soll-Anzahl der SV beim Zeitschritt k	[-]
$v_{L\_soll\_k}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit links beim Zeitschritt k	[m/s]
$v_{R\_soll\_k}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit rechts beim Zeitschritt k	[m/s]

$$n_{SV\_ist\_theoretisch\_k} = \frac{a_{TL}}{b_T} \cdot v_{L\_mess\_k} \cdot |v_{L\_mess\_k}| + \frac{a_{TR}}{b_T} \cdot v_{R\_mess\_k} \cdot |v_{R\_mess\_k}| \quad 8-24$$

Mit:

$n_{SV\_ist\_theoretisch\_k}$	Theoretische Ist-Anzahl der SV beim Zeitschritt k	[-]
$v_{L\_mess\_k}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit links (Zeitschritt k)	[m/s]
$v_{R\_mess\_k}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit rechts (Zeitschritt k)	[m/s]

Für die theoretische Soll-Differenz der SV  $\Delta n_{SV\_soll\_k}$  beim Zeitschritt k gilt:

$$\Delta n_{SV\_soll\_k} = n_{SV\_soll\_theoretisch\_k} - n_{SV\_ist\_theoretisch\_k} \quad 8-25$$

Mit:

$\Delta n_{SV\_soll\_k}$	Theoretische Soll-Differenz der SV beim Zeitschritt k	[-]
--------------------------	---	-----

Und somit gilt:

$$\Delta n_{SV\_soll\_k} = \left( \begin{array}{l} \frac{a_{TL}}{b_T} \cdot (v_{L\_soll\_k} \cdot |v_{L\_soll\_k}| - v_{L\_mess\_k} \cdot |v_{L\_mess\_k}|) \\ + \frac{a_{TR}}{b_T} \cdot (v_{R\_soll\_k} \cdot |v_{R\_soll\_k}| - v_{R\_mess\_k} \cdot |v_{R\_mess\_k}|) \end{array} \right) \quad 8-26$$

Für jeden Zeitschritt k wird die berechnete Anzahl Strahlventilatoren  $\Delta n_{SV\_soll\_k}$  zu der aktuellen Anzahl Strahlventilatoren des letzten Zeitschrittes k-1 zu- oder abgeschaltet.

$$n_{SV\_soll\_k} = n_{SV\_soll\_k-1} + \Delta n_{SV\_soll\_k} \quad 8-27$$

Nach jedem Zeitschritt wird  $n_{SV\_soll}$  neu berechnet.

Die Abtastzeit  $t_S$  ist der einzige Einstellparameter dieser Regelung. Für die Abtastzeit gilt:

$$t_S = t_k - t_{k-1} \quad 8-28$$

Mit:

$t_S$	Abtastzeit	[s]
$t_k$	Zeit beim Zeitschritt k	[s]
$t_{k-1}$	Zeit beim Zeitschritt k-1	[s]

Für die Regelung des Systems mit Absaugung mit Schrittweiser Berechnung der Strahlventilatoren werden folgende Abtastzeiten untersucht:

$$t_S = \{60 [s], 90 [s], 120 [s]\} \quad 8-29$$

Mit:

$t_S$	Abtastzeit	[s]
-------	------------	-----

## 8.2.2 Regelungsziel bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS

Bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr wird bei Systemen mit Absaugung auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

In Kapitel 6.4.2 wurde das Regelungsziel des Systems ABS bei Symmetrischer Regelung definiert.

Es gilt:

$$v_{L\_soll} = \frac{v_{L\_mess} - v_{R\_mess}}{2} \quad 8-30$$

Mit:

$v_{L\_soll}$	Soll-Strömungsgeschwindigkeit des linken Lüftungsabschnitts	[m/s]
$v_{L\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit links	[m/s]
$v_{R\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit rechts	[m/s]

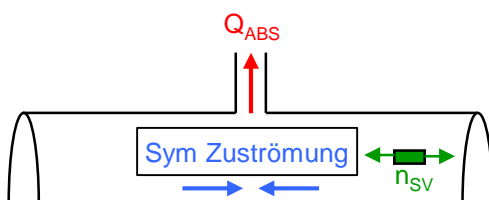


Abb. 8.4 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr mit Stau oder bei Gegenverkehr: Symmetrische Anströmung zur Absaugstelle

### 8.2.3 Regelungsziel bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit des Systems ABS

Bei Richtungsverkehr ohne Stau wird bei Systemen mit Absaugung die Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts von der Absaugstelle in Verkehrsrichtung auf einen Sollwert geregelt.

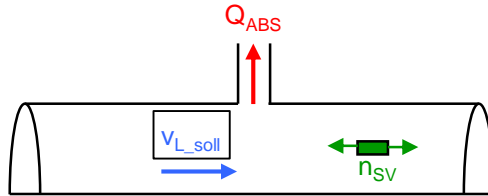


Abb. 8.5 Regelungsziel bei Systemen mit Absaugung bei Richtungsverkehr ohne Stau: Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

In Kapitel 6.4.3 wurde das Regelungsziel des Systems ABS bei Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit definiert

Es gilt:

$$v_{L\_soll} = 3 \text{ [m/s]} \quad 8-31$$

Für die Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren wird bei Absaugung auch die Sollströmung auf der rechten Seite benötigt.

Für  $v_{R\_soll}$  gilt:

$$v_{R\_soll} = v_{L\_soll} - \frac{Q_{ABS}}{A_T} \quad 8-32$$

Für die Absaugmenge  $Q_{ABS}$  wird angenommen:

$$Q_{ABS} = v_{L\_mess} \cdot A_T - v_{R\_mess} \cdot A_T \quad 8-33$$

Mit:

$v_{L\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit links	[m/s]
$v_{R\_mess}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit rechts	[m/s]

Und somit ergibt sich für  $v_{R\_soll}$ :

$$v_{R\_soll} = v_{L\_soll} - (v_{L\_mess} - v_{R\_mess}) \quad 8-34$$

## 8.2.4 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und symmetrischer Regelung

Abb. 8.6 zeigt den Regelkreis für symmetrische Regelung mit Modellbasiertem Regler, limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

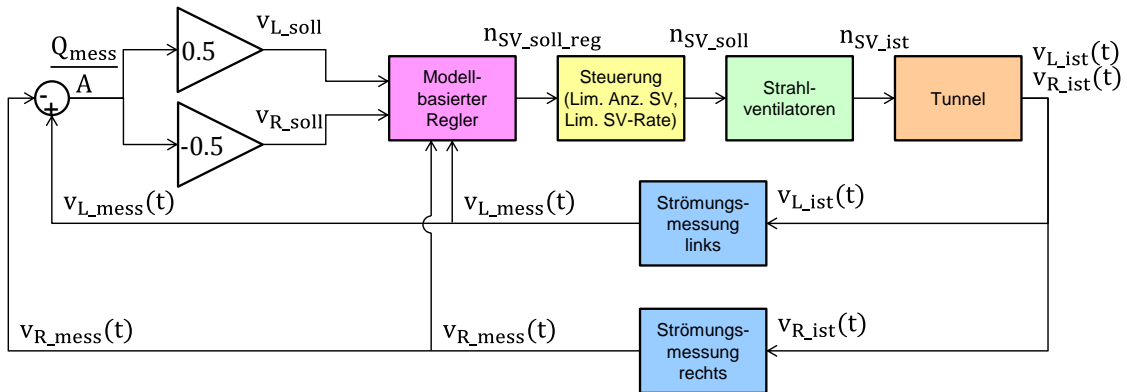


Abb. 8.6 Regelkreis für Symmetrische Regelung: Modellbasierter Regler, limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

## 8.2.5 Regelungskreis des Systems mit Absaugung und Regelung von $v_L$

Abb. 8.7 zeigt den Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit mit Modellbasiertem Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

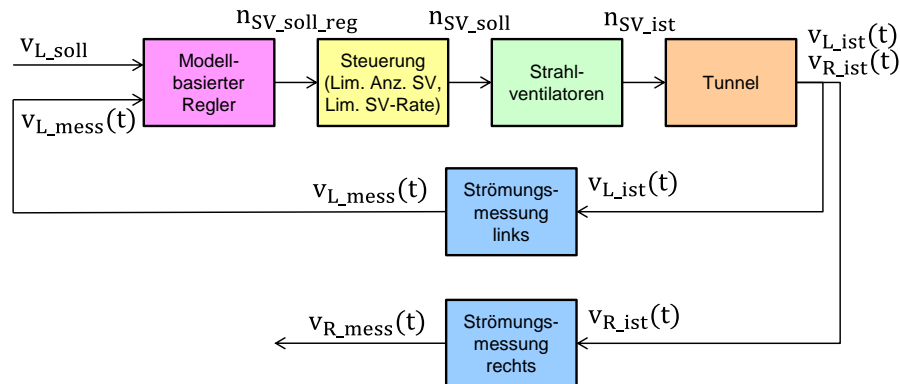


Abb. 8.7 Regelkreis für Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit: Modellbasierter Regler, Steuerung (Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 8.2.6 Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 8.8 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

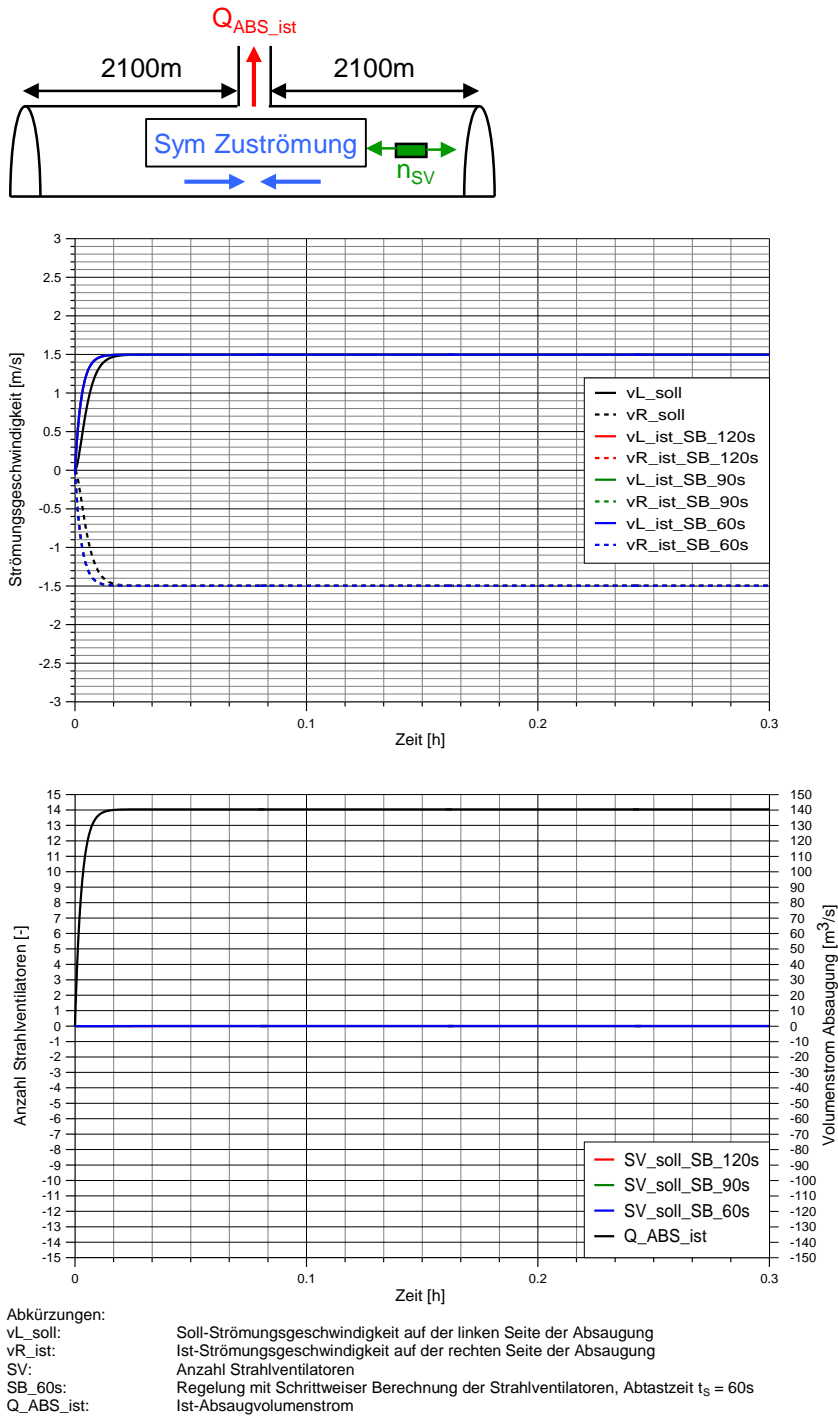


Abb. 8.8 Symmetrische Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Die Kurven der verschiedenen Regelungen liegen übereinander. Bei symmetrischer Regelung und Absaugung in der Mitte hat die Regelung „nichts zu tun“. Da keine asymmetrischen Stördücke auftreten, werden keine Strahlventilatoren benötigt.

Tab. 8.2 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	$\approx 0.5$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	$\approx 0.5$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	$\approx 0.5$ min

*Tab. 8.2 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten*

### 8.2.7 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 8.9 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

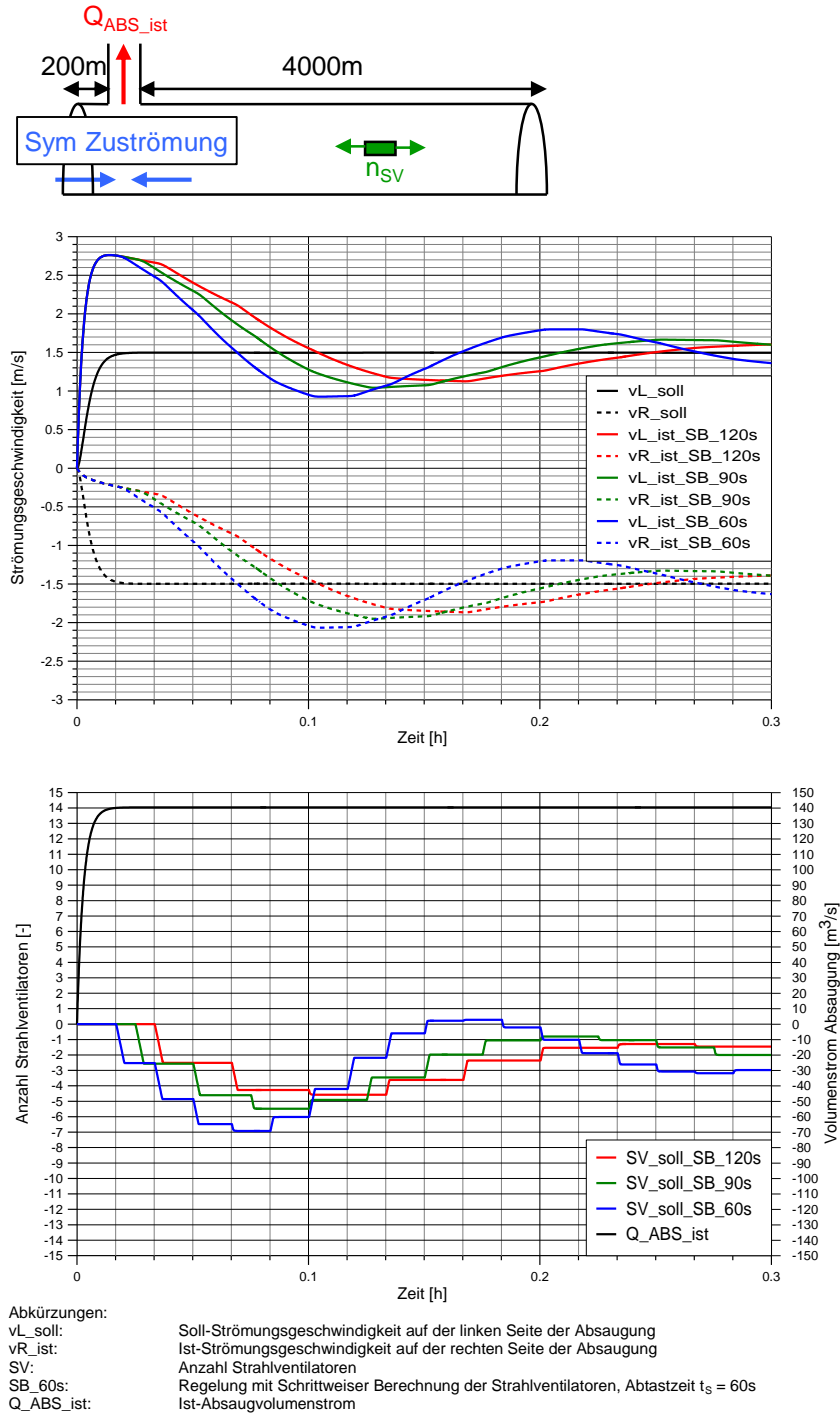


Abb. 8.9 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.3 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 1.3$ m/s $\approx 90\%$	$\approx 15$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 1.3$ m/s $\approx 90\%$	$\approx 16$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120s$ )	$\approx 0.5$ min	$\approx 1.3$ m/s $\approx 90\%$	$\approx 13$ min

*Tab. 8.3 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten*

### 8.2.8 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 8.10 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

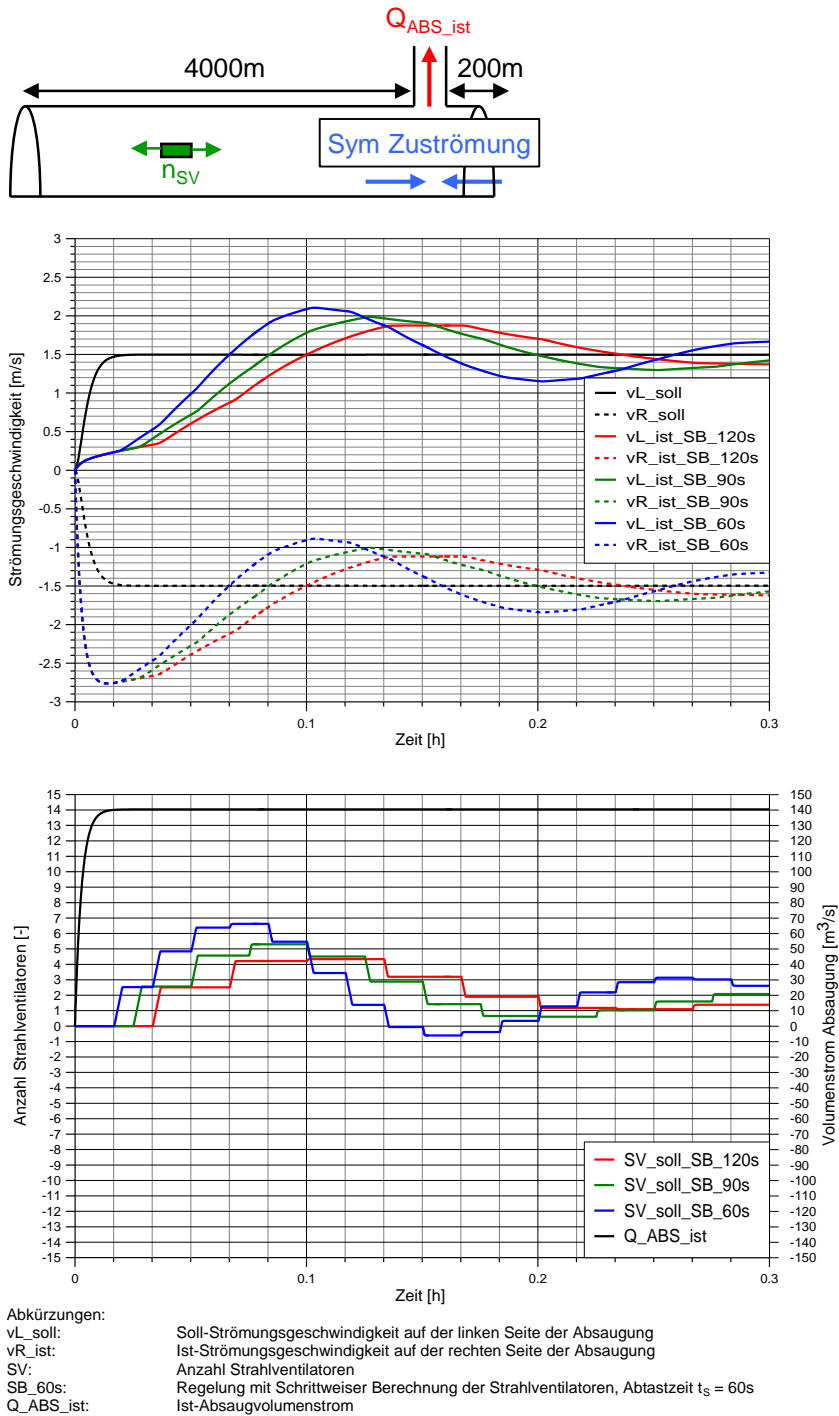


Abb. 8.10 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.4 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	$\approx 4$ min	$\approx 0.6$ m/s $\approx 40\%$	$\approx 15$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90s$ )	$\approx 5$ min	$\approx 0.5$ m/s $\approx 35\%$	$\approx 17$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120s$ )	$\approx 6$ min	$\approx 0.4$ m/s $\approx 30\%$	$\approx 13$ min

*Tab. 8.4 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten*

### 8.2.9 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 8.11 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

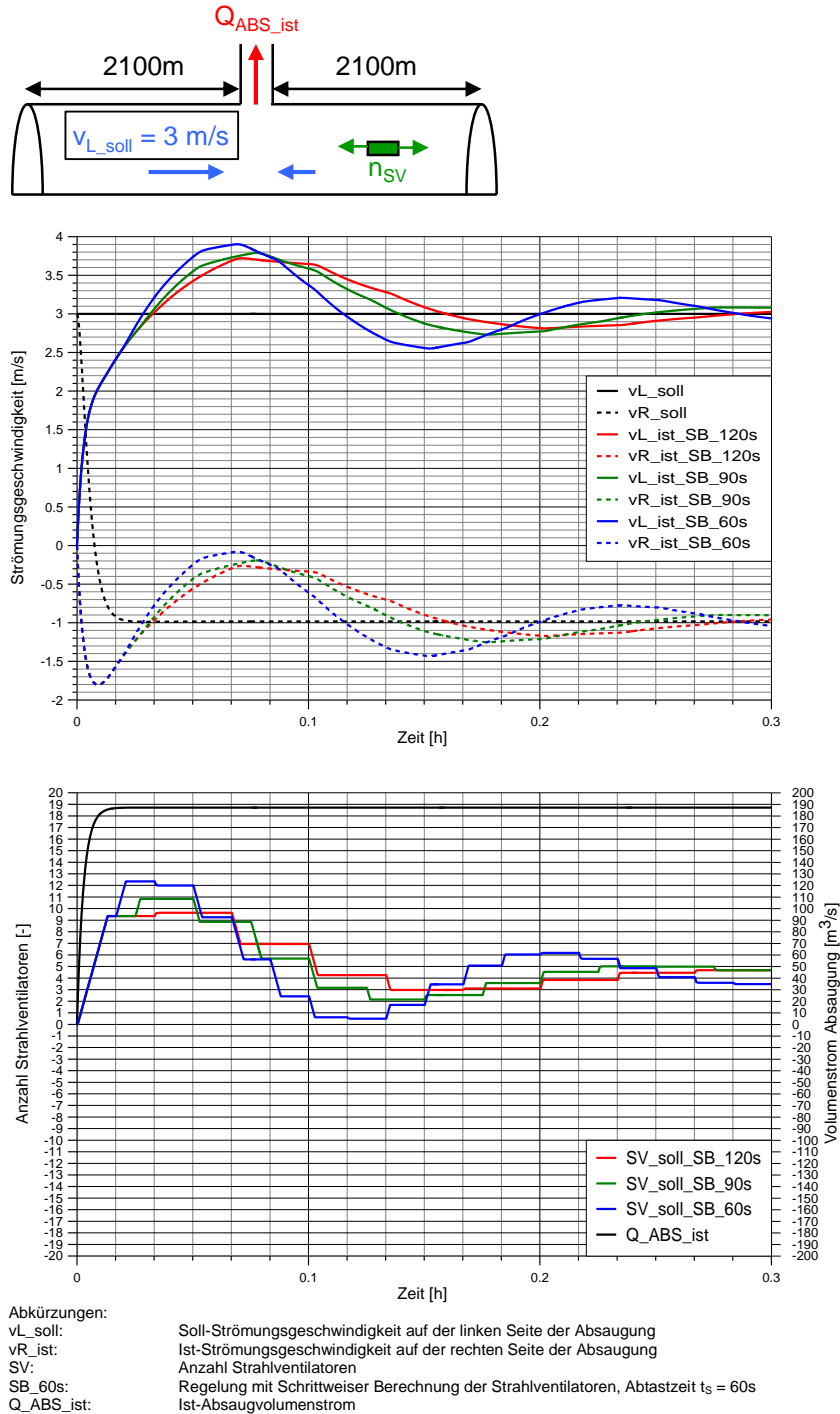


Abb. 8.11 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.5 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Regelung $v_{L\_soll} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.9 \text{ m/s}$ $\approx 30\%$	$\approx 11 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90\text{s}$ )	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.8 \text{ m/s}$ $\approx 27\%$	$\approx 6 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120\text{s}$ )	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.7 \text{ m/s}$ $\approx 25\%$	$\approx 7 \text{ min}$

Tab. 8.5 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten

### 8.2.10 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 8.12 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

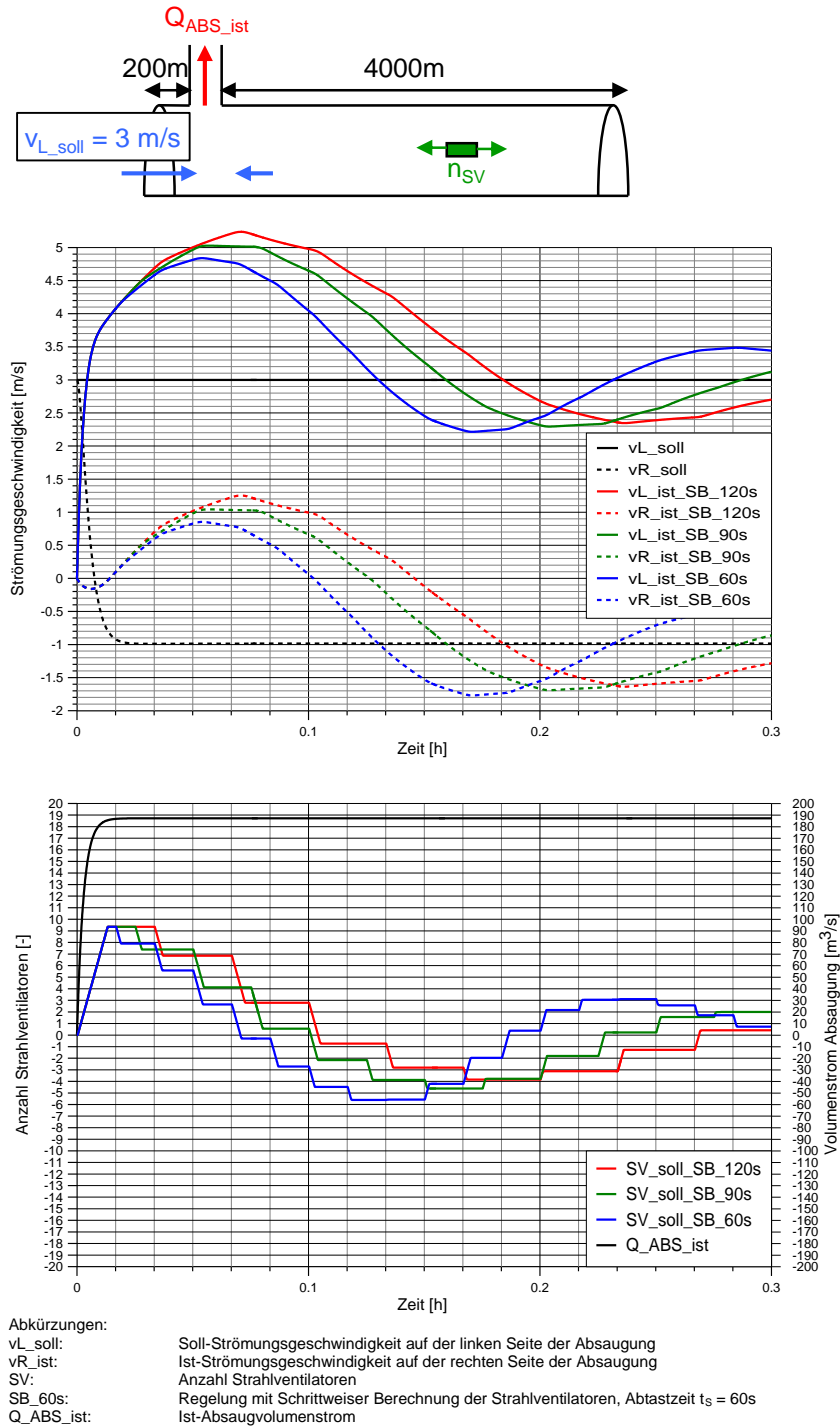


Abb. 8.12 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.6 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Regelung $v_{L\_soll} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	< 0.5 min	$\approx 1.8 \text{ m/s}$ $\approx 60\%$	> 15 min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90\text{s}$ )	< 0.5 min	$\approx 2.0 \text{ m/s}$ $\approx 67\%$	> 15 min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120\text{s}$ )	< 0.5 min	$\approx 2.3 \text{ m/s}$ $\approx 77\%$	> 15 min

Tab. 8.6 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten

### 8.2.11 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 8.13 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

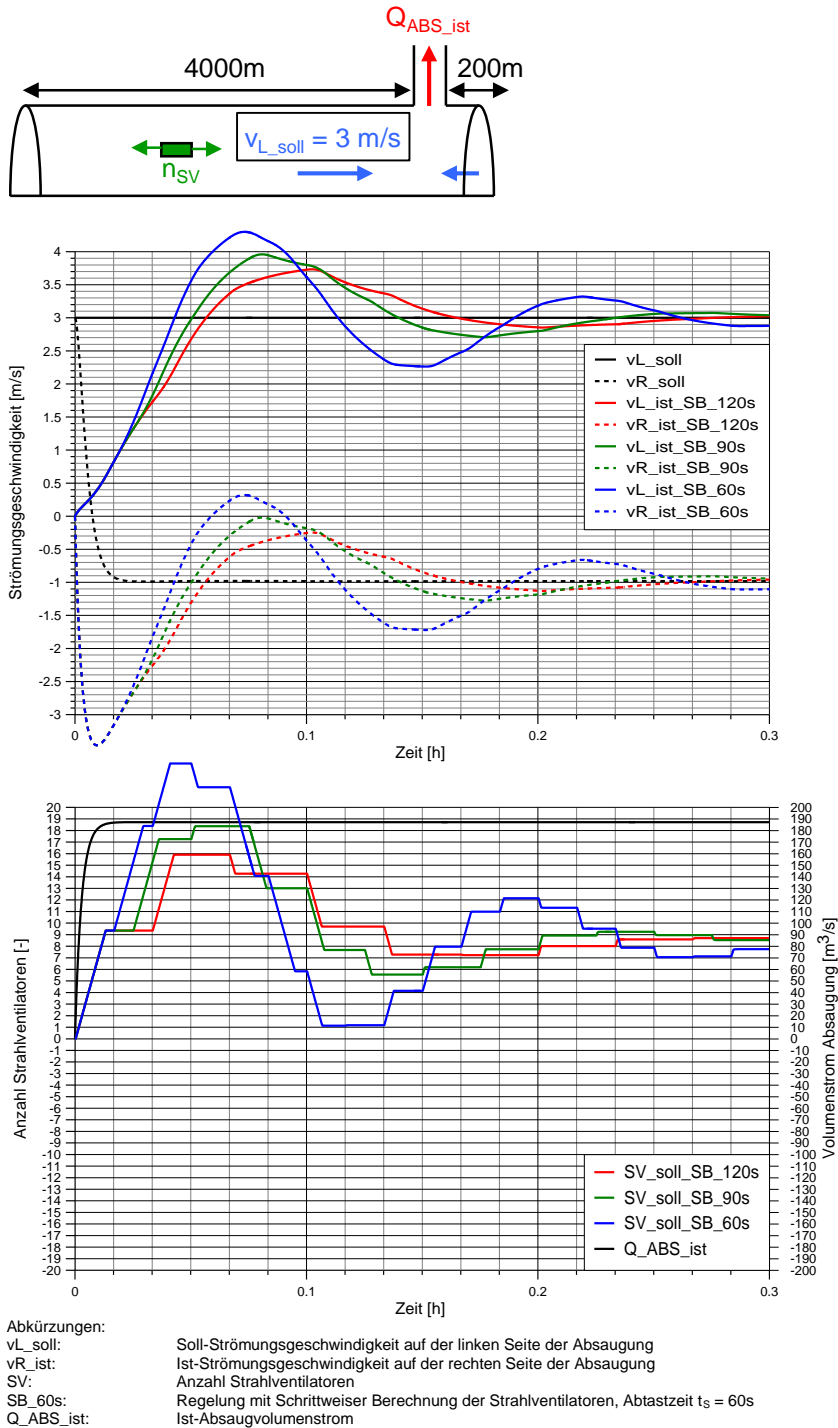


Abb. 8.13 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $t_s = \{60s; 90s; 120s\}$ )

Tab. 8.7 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten.

Regelung $v_{L, \text{soll}} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 1.5 \text{ m/s}$ $\approx 50\%$	$\approx 11 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=90\text{s}$ )	$\approx 3 \text{ min}$	$\approx 1 \text{ m/s}$ $\approx 34\%$	$\approx 7 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=120\text{s}$ )	$\approx 3.5 \text{ min}$	$\approx 0.8 \text{ m/s}$ $\approx 27\%$	$\approx 8 \text{ min}$

Tab. 8.7 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit „Schrittweiser Berechnung der Anzahl SV“ mit verschiedenen Abtastzeiten

### 8.2.12 Schlussfolgerungen Regelung des Systems mit Absaugung mit Schrittweiser Berechnung der SV

Die symmetrische Regelung beim System mit Absaugung hängt entscheidend vom Absaugort ab. Bei Absaugung in der Mitte hat die Regelung wenig bis nichts zu tun, da keine asymmetrischen Stördrücke auftreten. Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die Asymmetrie ausgleichen.

Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit dar:

- Bei grösseren Abtastzeiten ist die Überschwingung kleiner und das System schwingt schneller ein. Dafür dauert die Anstiegszeit länger
- Bei kleineren Abtastzeiten ist die Anstiegszeit kürzer. Dafür ist die Überschwingung grösser und das System schwingt länger.

## 9 Model Predictive Control (MPC-Regelung)

### 9.1 Funktionsprinzip [21]

Ein MPC-Regler beobachtet und registriert den historischen Verlauf der Prozessvariablen (Steuer- und Regelgrößen, messbare Störgrößen). Da er intern über ein vollständiges Modell der Prozessdynamik mit allen Verkopplungen zwischen den Steuer- und Regelgrößen verfügt, kann er ein Stück „in die Zukunft schauen“, d.h. Vorhersagen („Prädiktionen“ über einen bestimmten Zeithorizont machen. Er kann berechnen wohin sich die Regelgrößen bewegen werden, wenn vom Regler nicht eingegriffen wird („future without control“). Bei der Prädiktion kann auch die Wirkung messbarer Störgrößen berücksichtigt werden.

Darüber hinaus kann der Regler auch „ausprobieren“ (simulieren), wie sich zukünftige Änderungen der verfügbaren Stellgrößen auf die Regelgrößen auswirken: „future with control“. Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens wird die beste Stellstrategie ausgewählt. Die Arbeitsweise ist mit der eines Schachcomputers vergleichbar. Es werden verschiedene Kombinationen von zukünftigen Zügen ausprobiert und entsprechend ihrer Wirkung bewertet, bevor eine Entscheidung getroffen wird.

Abb. 9.1 zeigt ein Beispiel des Grundprinzips der modellbasierten Prädiktivregelung.

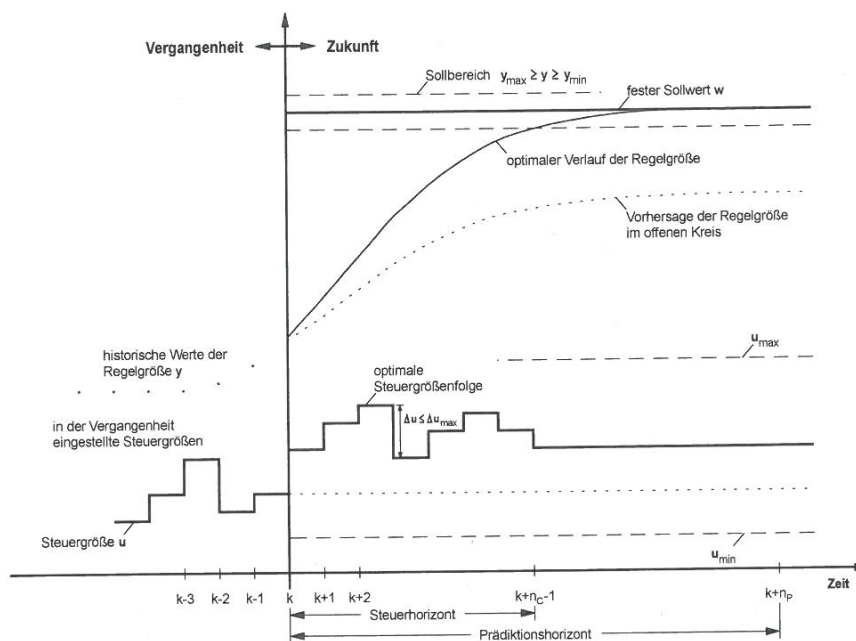


Abb. 9.1 Grundprinzip der modellbasierten Prädiktivregelung [21]

Es sind:

- $t_s$  Abtastzeit (sampling time)
- $k$  Aktueller Zeitschritt
- $n_P$  Prädiktionshorizont (prediction horizon)
- $n_C$  Steuerhorizont (control horizon)
- $y$  Regelgröße
- $\hat{y}$  Vorhersagewert
- $u$  Steuergröße
- $e$  Regeldifferenz (error)
- $w$  Sollwert
- $z$  Messbare Störgrößen

Alle MPC-Regelungsalgorithmen haben folgende 4 Hauptschritte gemeinsam, die in jedem Abtastintervall abgearbeitet werden:

- Prädiktion
- Dynamische Optimierung
- Prinzip des gleitenden Horizonts
- Vorhersagekorrektur

Diese vier Hauptschritte sind Elemente eines jeden prädiktiven Regelungsverfahrens in seiner „Minimalversion“.

Im Folgenden werden die einzelnen Hauptschritte beschrieben.

### 9.1.1 Prädiktion

Es wird eine Vorhersage (über den Zeithorizont  $n_p$ ) des zukünftigen Verlaufs der Regelgröße  $y$  und der Regeldifferenz  $e$  unter der Annahme durchgeführt, dass sich die Steuergröße  $u$  in der Zukunft nicht ändert.

Abb. 9.2 zeigt schematisch die Prädiktion der freien und der erzwungenen Bewegung der Regelgröße.

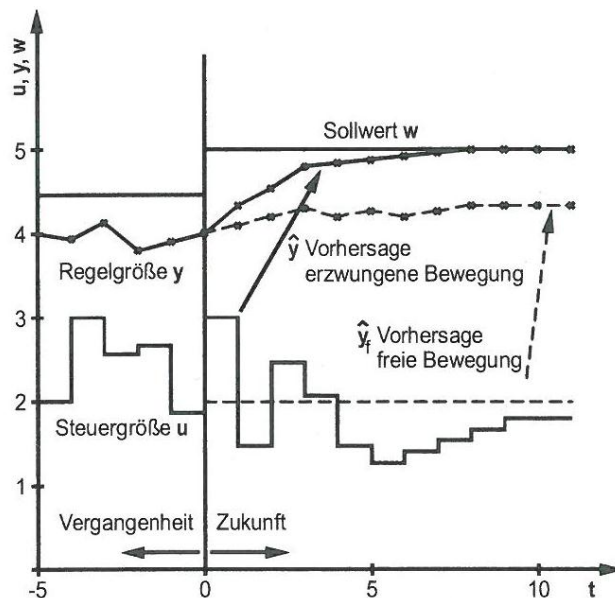


Abb. 9.2 Prädiktion der freien und der erzwungenen Bewegung der Regelgröße

### 9.1.2 Dynamische Optimierung

Über den Steuerhorizont  $n_C$  wird eine optimale Steuergrößenabfolge ermittelt (Optimierungsproblem). Ziel ist es die Regeldifferenzen zu minimieren bei gleichzeitig möglichst wenig Stellaktivität. Nur im einfachsten Fall ist die Lösung dieses Optimierungsproblems analytisch möglich.

Abb. 9.3 zeigt schematisch die Prädiktion der freien und der erzwungenen Bewegung der Regelgröße bei einer möglichen Abfolge der Steuergröße. Daraus lassen sich die Regeldifferenzen ableiten. Die Regeldifferenzen und die Stellaktivität werden in einem weiteren Schritt gewichtet. Mit der Gewichtung der Regeldifferenzen und der Stellaktivitäten wird dann die optimale Steuergrößenabfolge ermittelt.

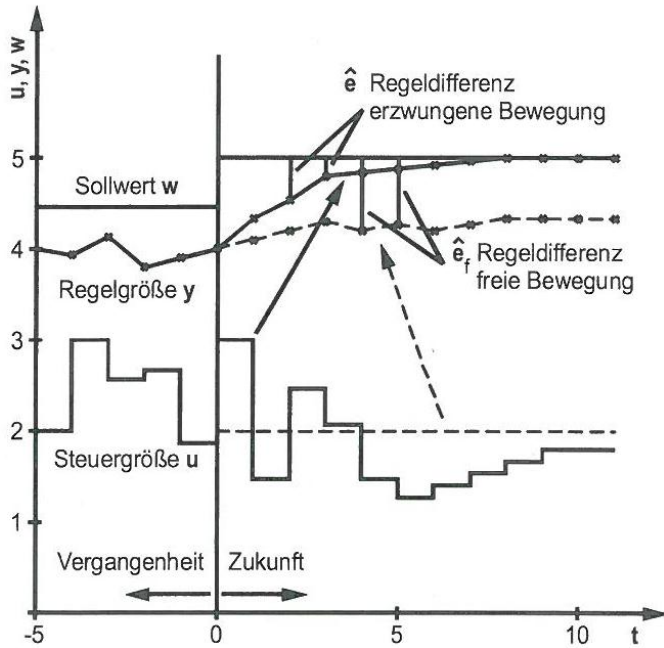


Abb. 9.3 Prädiktion der Regelabweichungen bei einer möglichen Abfolge der Steuergröße

Abb. 9.4 zeigt die Prädiktion der Regelabweichungen einer möglichen Abfolge der Steuergröße als graue Fläche. Diese graue Fläche wird für jede mögliche Abfolge gewichtet. Wird zum Beispiel nur die Regelabweichung gewichtet, so ist die Abfolge mit der kleinsten Fläche die optimale Abfolge.

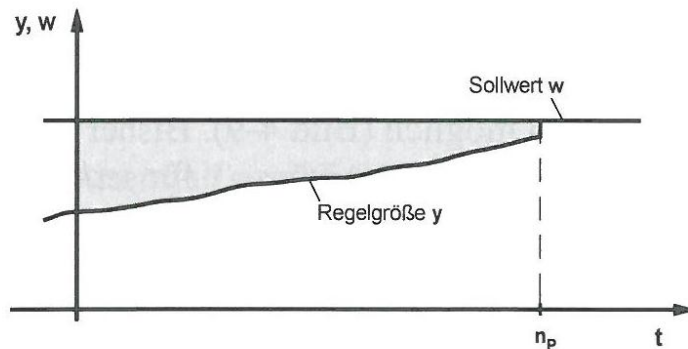


Abb. 9.4 Gewichtung der Regelabweichungen einer möglichen Abfolge der Steuergröße

### 9.1.3 Prinzip des gleitenden Horizonts

Nur das erste Element der optimalen Steuergrößenabfolge wird weitergegeben. Nach Verschiebung des betrachteten Zeithorizonts, erfolgt im nächsten Abtastintervall eine Wiederholung der gesamten Prozedur mit Prädiktion und Optimierung.

### 9.1.4 Vorhersagekorrektur

Mit dem eintreffenden Messwert wird die Vorhersage fortlaufend korrigiert.

Abb. 9.5 zeigt schematisch die Korrektur der Vorhersage.

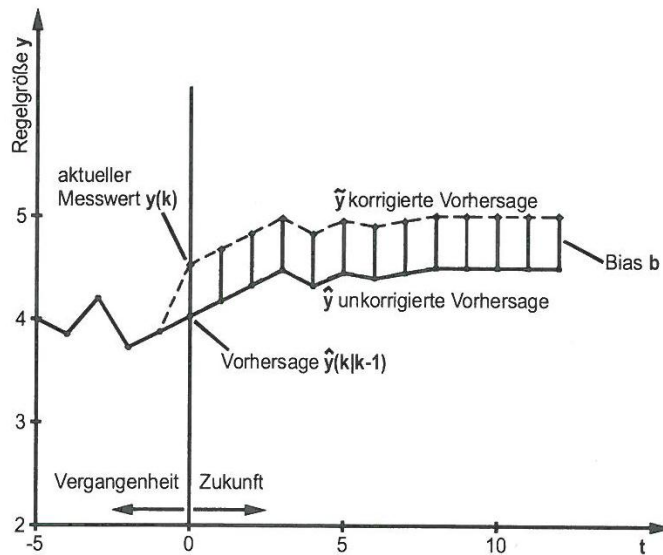


Abb. 9.5 Korrektur der Vorhersage

## 9.2 Einstellparameter von MPC-Reglern

Wichtigste Parameter:

- Abtastzeit  $t_s$
- Modellhorizont  $n_M$
- Steuerhorizont  $n_C$
- Prädiktionshorizont  $n_P$
- Gewichtungsmatrix Q (Gewichtung der Regelabweichungen)
- Gewichtungsmatrix R (Gewichtung der Stellaktivität)

Mögliche Vereinfachungen:

$$\begin{aligned} n_C &= 1 \\ n_C &= n_P = 1 \\ R &= 0 \end{aligned}$$

### 9.2.1 Abtastzeit $t_s$

Je schneller die Streckendynamik ist, desto kürzer ist die Abtastzeit zu wählen. Eine Faustregel gemäss [21] ist zum Beispiel:

$$\frac{t_{95\%}}{15} \leq t_s \leq \frac{t_{95\%}}{6} \quad 9-1$$

Wobei  $t_{95\%}$  die Zeit ist, nach der die Sprungantwort der Regelstrecke 95% ihres Endwerts erreicht hat.

Für das System Längslüftung mit  $n_{SV} = 24$  ergibt sich:

$$t_{95\%} \approx 215 \text{ s} \quad 9-2$$

Und somit:

$$\frac{t_{95\%}}{15} \approx 15 \text{ s} \leq t_s \leq \frac{t_{95\%}}{6} \approx 35 \text{ s} \quad 9-3$$

Da bei einer Änderung des Sollwerts der Regler erst nach Verstreichen einer Abtastzeit reagieren kann, sollte die Abtastzeit eher klein gewählt werden.

Die reale Steuerung kann alle 5 s einen Strahlventilator einschalten. Mit einer Abtastzeit grösser als 5 s müssten pro Zeitschritt mehrere Strahlventilatoren eingeschaltet werden.

Damit pro Zeitschritt genau ein Strahlventilator eingeschaltet werden kann, wird eine Abtastzeit von  $t_s = 5 \text{ s}$  gewählt.

$$t_s = 5 \text{ s} \quad 9-4$$

### 9.2.2 Modellhorizont $n_M$

Der Modellhorizont  $n_M$  hängt eng mit der Wahl der Abtastzeit  $t_S$  zusammen.

In der Regel sollte gelten (gemäss [21]):

$$n_M \cdot t_S \leq t_{99\%} \quad 9-5$$

Durch diese Wahl wird gesichert, dass nahezu die gesamte Übergangsfunktion der Regelstrecke im Prozessmodell berücksichtigt wird.

Für das System Längslüftung mit  $n_{SV} = 1$  ergibt sich:

$$t_{99\%} \approx 1600 \text{ s} \quad 9-6$$

Durch die Wahl der Abtastzeit von  $t_S = 5 \text{ s}$  ergibt sich:

$$n_M \leq \frac{t_{99\%}}{t_S} \approx 320 \quad 9-7$$

### 9.2.3 Steuerhorizont $n_C$

Der Steuerhorizont  $n_C$  gibt an, über welchen Zeitraum die zukünftigen Steuergrössenänderungen berechnet werden. Eine Erhöhung von  $n_C$  bewirkt:

- Eine Erhöhung des Rechenaufwands für die Lösung des dynamischen Optimierungsproblems
- Ein aggressiveres Stellverhalten, d.h. im Durchschnitt höhere Stellamplituden
- Eine Verringerung der integralen Regeldifferenz
- Eine Verringerung der Robustheit gegenüber Modellunsicherheit

Gemäss [21] wird empfohlen:

$$5 < n_C < 20 \quad 9-8$$

Oder

$$\frac{n_M}{3} < n_C < \frac{n_M}{2} \quad 9-9$$

Es wird ein Steuerhorizont von  $n_C=20$  gewählt.

$$n_C = 20 \quad 9-10$$

### 9.2.4 Prädiktionshorizont $n_P$

Gemäss [21] wird empfohlen:

$$n_P \geq n_M + n_C \quad 9-11$$

Mit der Wahl von  $n_M$  und  $n_C$  ergibt sich somit:

$$n_P = 340 \quad 9-12$$

### 9.2.5 Gewichtungsmatrizen Q und R

Die Gewichtungsmatrix Q bezieht sich auf die Regelgrössen y.

Diagonalmatrix ( $n_y \ n_P \times n_y \ n_P$ ).

Die Gewichtungsmatrix R bezieht sich auf die Steuergrössen u.

Diagonalmatrix ( $n_u \ n_C \times n_u \ n_C$ ).

Die maximale Einschaltzeit der Strahlventilatoren ist bereits durch die Steuerung vorgegeben. Um eine möglichst schnelle Regelung zu erzielen wird somit nur die Regelgrösse y gewichtet.

Somit werden folgende Gewichtungen gewählt:

$$Q = 1 \quad 9-13$$

$$R = 0 \quad 9-14$$

### 9.2.6 Zusammenfassung Einstellparameter für MPC-Regelung

Die Parameter des MPC-Reglers lassen sich wie folgt zusammenfassen:

$$t_s = 5 \text{ s} \quad 9-15$$

$$n_p = 340 \quad 9-16$$

$$n_c = 20 \quad 9-17$$

$$Q = 1 \quad 9-18$$

$$R = 0 \quad 9-19$$

## 9.3 Interne lineare Systemmodelle für den MPC-Regler

Für die MPC-Regelung wird ein lineares Modell des Systems Längslüftung benötigt, welches den Tunnel, die Strahlventilatoren als auch die Filterung der Strömungsmessung beinhaltet.

Es werden die folgenden internen linearen Modelle des Systems gemäss Kapitel 4 verwendet:

- Linearisiertes System LL PT2 mit Messung
- System LL als Tiefpass 2. Ordnung (PT2) mit Messung
- System LL als Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit (PT1TZ) mit Messung
- Linearisiertes System LL PT3 mit Messung
- System LL als Tiefpass 3. Ordnung (PT3) mit Messung

## 9.4 Regelung des Systems Längslüftung mit MPC-Regler

### 9.4.1 Regelungsziel beim System Längslüftung

In Kapitel 6.4.1 wurde das Regelungsziel des Systems Längslüftung definiert.

Beim System Längslüftung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$  geregelt.

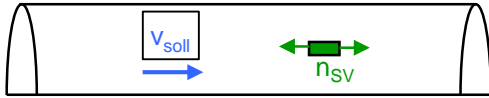


Abb. 9.6 Regelungsziel beim System Längslüftung: Regelung auf eine Soll-Strömungsgeschwindigkeit

Je nachdem, ob es sich um Richtungsverkehr mit oder ohne Stau oder um Gegenverkehr handelt, wird gemäss [1] auf eine andere Strömungsgeschwindigkeit geregelt:

Regelungsziel bei Richtungsverkehr ohne Stau gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 3 \text{ [m/s]} \quad 9-20$$

Mit:

$$v_{\text{soll}} \quad \text{Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel} \quad \text{[m/s]}$$

Regelungsziel bei Richtungsverkehr mit Stau oder Gegenverkehr gemäss [1]:

$$v_{\text{soll}} = 1 \text{ [m/s]} \quad 9-21$$

### 9.4.2 Regelungskreis des Systems Längslüftung

Wie bei der PID-Regelung werden die Messfilterung und die limitierte SV-Einschaltrate der Strahlventilatoren in den Regelkreis miteinbezogen. Bei der Regelung mit MPC kann die maximale Einschalttrate der Strahlventilatoren direkt im MPC-Regler definiert werden.

Abb. 9.7 zeigt den Regelkreis mit MPC-Regler, limitierter SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Filterung der Strömungsmessung im Signalflussbild.

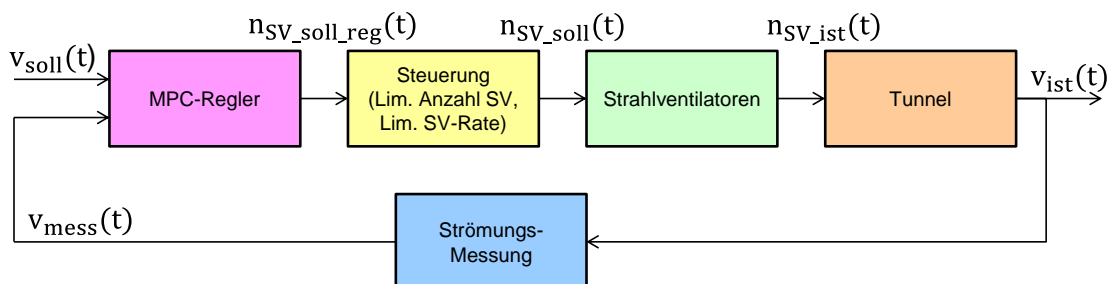


Abb. 9.7 Regelkreis: MPC-Regler, limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

### 9.4.3 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit MPC-Regelung

Abb. 9.8 zeigt die Regelung des Nicht-Linearen Systems inklusive Messfilterung und SV-Rampe mit einem MPC-Regler.

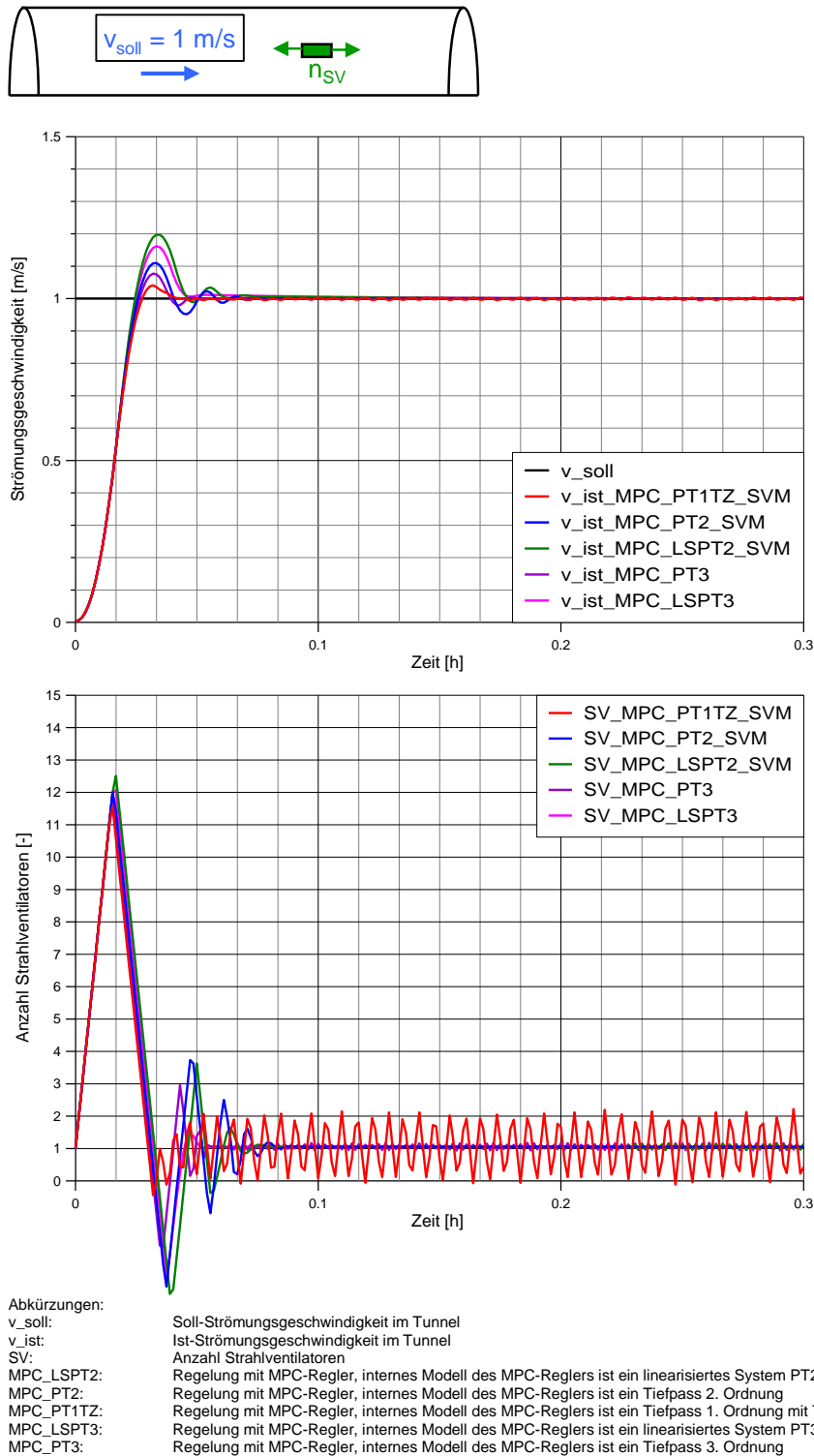


Abb. 9.8 MPC-Regelung in MATLAB mit verschiedenen Modellen (LS, PT2, PT1TZ)  
 MPC-Parameter:  $t_s = 5s$ ,  $n_p = 340$ ,  $n_c = 20$ ,  $Q = 1$ ,  $R = 0$   
 (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $T_{SV\_TZ} = \tau_{SV} = 5s$ ,  $\tau_{mess} = 10s$ )

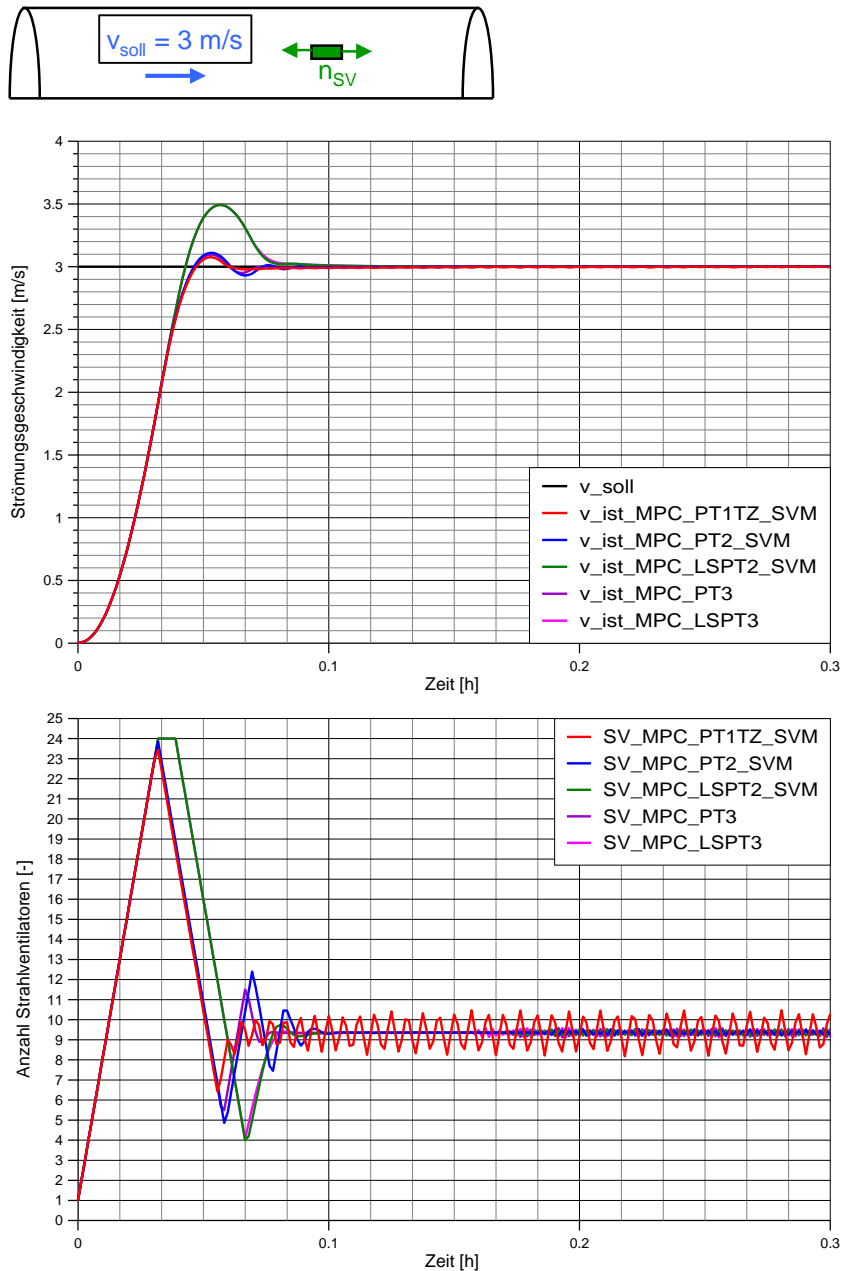
Tab. 9.1 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
MPC (System PT1TZ)	< 2 min	< 0.1 m/s < 10%	< 2 min
MPC (Lin. System PT2)	< 2 min	$\approx 0.2$ m/s $\approx 20\%$	< 3 min
MPC (System PT2)	< 2 min	$\approx 0.1$ m/s $\approx 10\%$	$\approx 2$ min
MPC (Lin. System PT3)	< 2 min	$\approx 0.15$ m/s $\approx 15\%$	$\approx 2.5$ min
MPC (System PT3)	< 2 min	< 0.1 m/s < 10%	< 2 min

Tab. 9.1 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung

### 9.4.4 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit MPC-Regelung

Abb. 9.9 zeigt die Regelung des Nicht-Linearen Systems inklusive Messfilterung und SV-Rampe mit einem MPC-Regler.



Abkürzungen:  
 v\_soll: Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 v\_ist: Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 SV: Anzahl Strahlventilatoren  
 MPC\_LSPT2: Regelung mit MPC-Regler, internes Modell des MPC-Reglers ist ein linearisiertes System PT2  
 MPC\_PT2: Regelung mit MPC-Regler, internes Modell des MPC-Reglers ist ein Tiefpass 2. Ordnung  
 MPC\_PT1TZ: Regelung mit MPC-Regler, internes Modell des MPC-Reglers ist ein Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit  
 MPC\_LSPT3: Regelung mit MPC-Regler, internes Modell des MPC-Reglers ist ein linearisiertes System PT3  
 MPC\_PT3: Regelung mit MPC-Regler, internes Modell des MPC-Reglers ist ein Tiefpass 3. Ordnung

Abb. 9.9 MPC-Regelung in MATLAB mit verschiedenen Modellen (LS, PT2, PT1TZ)  
 MPC-Parameter:  $t_S = 5 \text{ s}$ ,  $n_P = 340$ ,  $n_C = 20$ ,  $Q = 1$ ,  $R = 0$   
 (mit  $n_{Fz} = 0$ ,  $T_{SV\_TZ} = \tau_{SV} = 5 \text{ s}$ ,  $\tau_{mess} = 10 \text{ s}$ )

Tab. 9.2 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
MPC (System PT1TZ)	< 3 min	< 0.1 m/s < 3%	< 3 min
MPC (Lin. System PT2)	< 3 min	$\approx 0.5$ m/s $\approx 17\%$	$\approx 4$ min
MPC (System PT2)	< 3 min	< 0.1 m/s < 3%	< 3 min
MPC (Lin. System PT3)	< 3 min	$\approx 0.5$ m/s $\approx 17\%$	$\approx 4$ min
MPC (System PT3)	< 3 min	< 0.1 m/s < 3%	< 3 min

Tab. 9.2 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung

#### 9.4.5 Schlussfolgerungen MPC-Regelung des Systems Längslüftung

Die Simulationen der Regelung mit MPC-Regler zeigen folgendes:

- Die MPC-Regler mit den linearisierten Systemen als internes Modell haben die grösste Überschwingung und die längste Einschwingzeit.
- Der MPC-Regler mit dem System PT1TZ als internes Modell hat eine bleibende Schaltungsaktivität.
- Am besten eignen sich die beiden internen Modelle PT2 und PT3.

### 9.5 Regelung des Systems mit Absaugung mit MPC-Regler

Auf die detaillierte Analyse der MPC-Regelung beim System mit Absaugung wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

- Die Parametrierung des internen Modells wird durch die Absaugung bedeutend komplexer und aufwändiger.
- Da der Ort der Absaugung in das interne Modell einfließt, muss für jeden Absaugort das interne Modell angepasst werden.
- Aufgrund der Struktur der Differentialgleichung (Tunnelmodell) werden keine grundsätzlich anderen Ergebnisse erwartet.
- Sowohl bei der PI-/PID-Regelung als auch bei der Regelung mit Schrittwiseiger Berechnung der Strahlventilatoren wird die Regelung besser, je näher sich der Absaugort der Mitte des Tunnels nähert. Das wird auch bei der MPC-Regelung erwartet.

## 10 Vergleich verschiedener Regelungen

### 10.1 Regelung des Systems Längslüftung auf Sollwert

#### 10.1.1 Regelung des Systems Längslüftung auf 1 m/s

Abb. 10.1 zeigt verschiedene Regelungen auf einen Sollwert von 1 m/s.

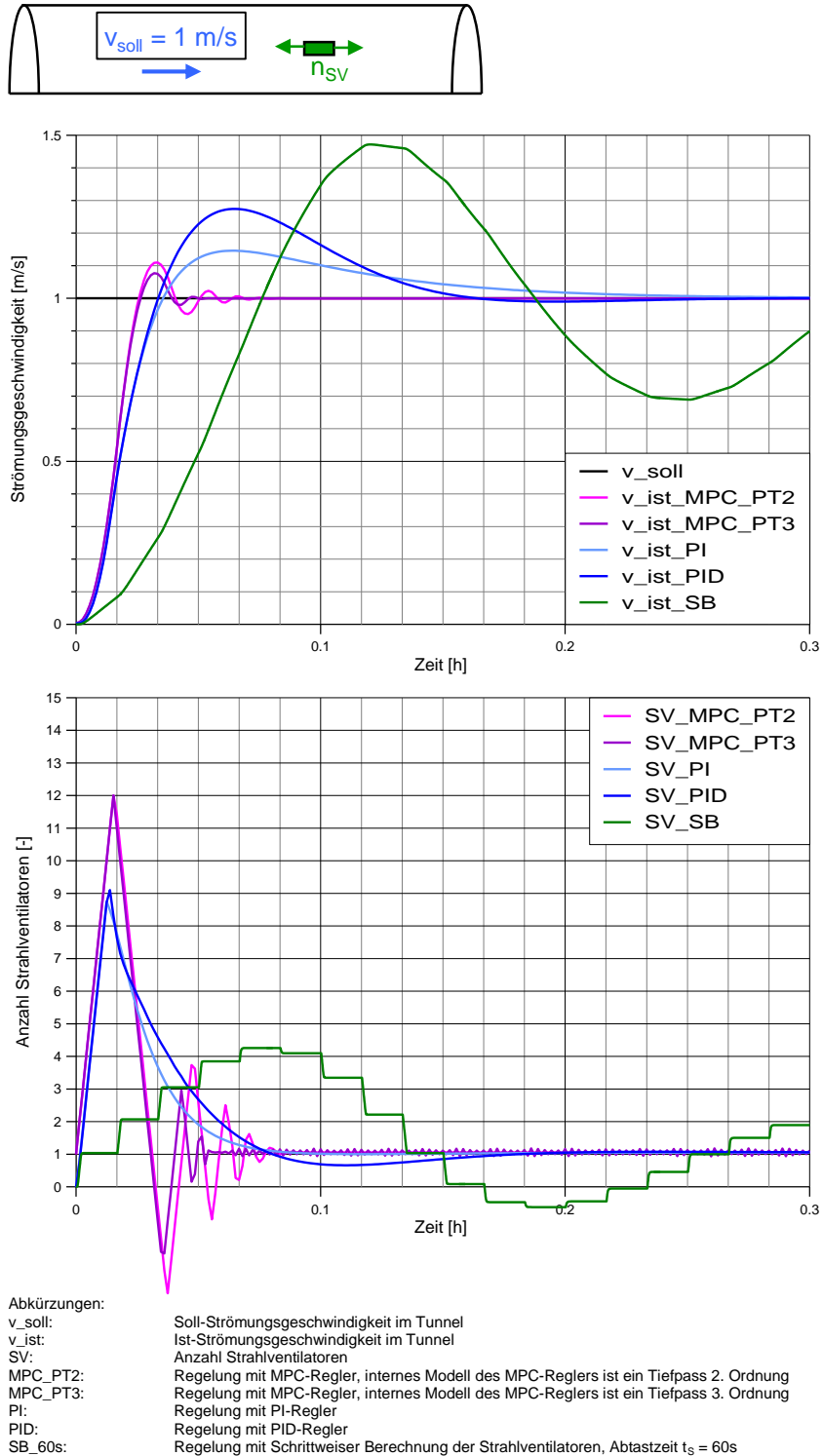


Abb. 10.1 Vergleich zwischen PID-, MPC-Regelung und Schrittwiseiger Berechnung der SV bei Regelung auf 1 m/s

Tab. 10.1 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 1.5 m/s.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI	< 2 min	$\approx 0.2$ m/s $\approx 20\%$	< 5 min
PID	< 2 min	$\approx 0.3$ m/s $\approx 30\%$	< 6 min
MPC-Regelung (PT2)	< 2 min	$\approx 0.1$ m/s $\approx 10\%$	$\approx 2$ min
MPC-Regelung (PT3)	< 2 min	$\approx 0.1$ m/s $\approx 10\%$	$\approx 2$ min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	< 4.5 min	$\approx 0.5$ m/s $\approx 50\%$	> 18 min

Tab. 10.1 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung

### 10.1.2 Regelung des Systems Längslüftung auf 3 m/s

Abb. 10.2 zeigt verschiedene Regelungen auf einen Sollwert von 3 m/s.

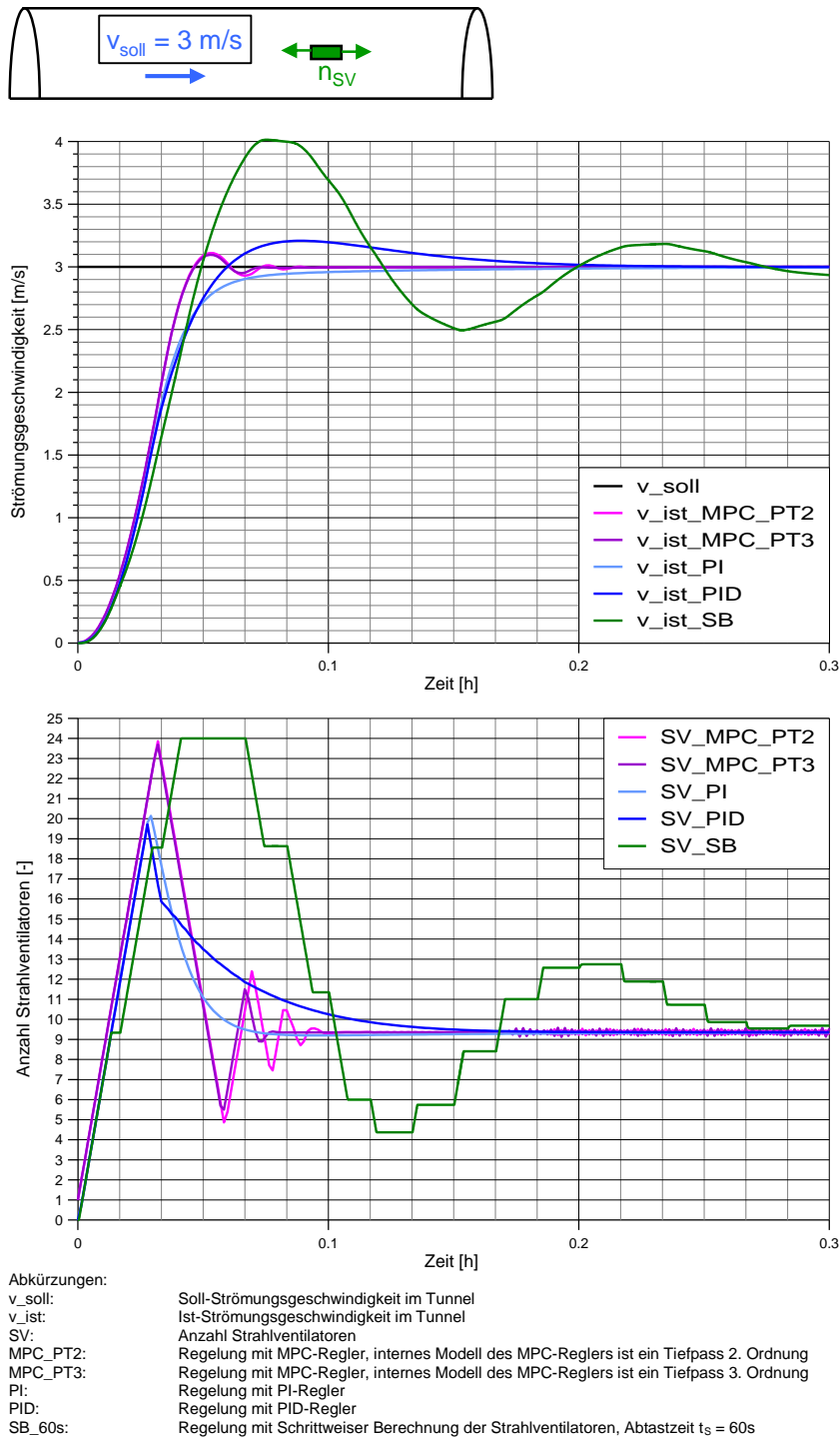


Abb. 10.2 Vergleich zwischen PID-, MPC-Regelung und Schrittweiser Berechnung der SV bei Regelung auf 3 m/s

Tab. 10.2 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit verschiedenen Reglern.

Regelung 3 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI	< 3 min	$\approx 0$ m/s $\approx 0\%$	< 3 min
PID	< 3 min	$\approx 0.2$ m/s $\approx 6\%$	< 3 min
MPC-Regelung (PT2)	< 3 min	< 0.1 m/s < 3%	< 3 min
MPC-Regelung (PT3)	< 3 min	< 0.1 m/s < 3%	< 3 min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	< 3 min	$\approx 1$ m/s $\approx 33\%$	> 11 min

Tab. 10.2 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL mit MPC-Regelung

### 10.1.3 Schlussfolgerung Vergleich Regelungen des Systems Längslüftung

- Die Regelung mit den verschiedenen Reglern zeigt, dass die MPC-Regelung schneller Regeln kann als die PID-Regelung.
  - Ähnliche Anstiegszeit
  - Ähnliche Überschwingung
  - Schnellere Einschwingzeit
- Die „Schrittweise Berechnung der Anzahl SV“ ist in allen Belangen schlechter als die PI-/PID-Regelung und die MPC-Regelung:
  - Längere Anstiegszeit (bei Regelung auf 1 m/s)
  - Grössere Überschwingung
  - Längere Einschwingzeit
- Der PI-Regler hat gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile
  - Kleinere Überschwingung
  - Nur 2 Parameter

## 10.2 Regelung des Systems mit Absaugung

### 10.2.1 Symmetrische Regelung mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 10.3 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen.

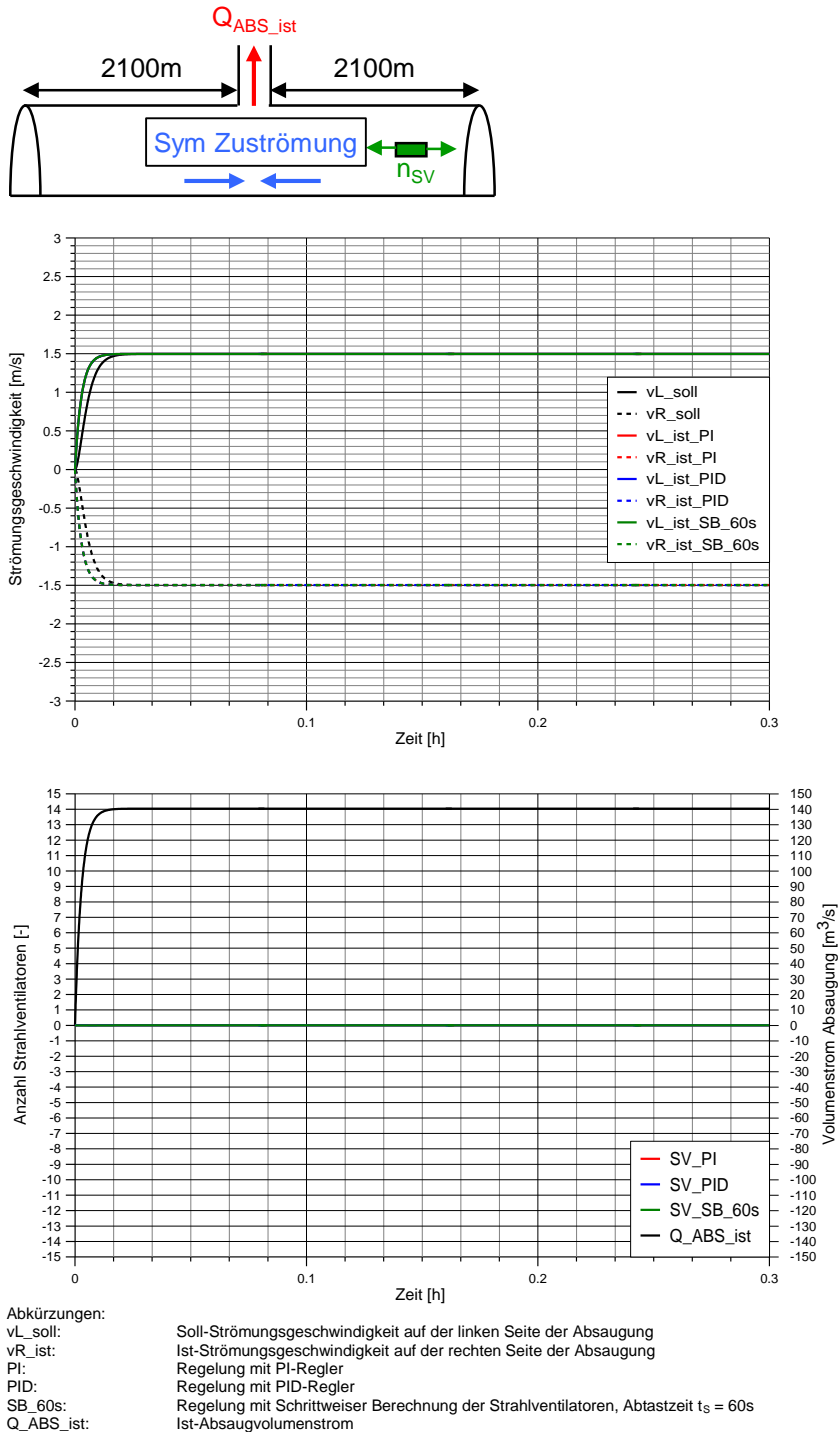


Abb. 10.3 Symmetrische Regelung bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen

Die Kurven der verschiedenen Regelungen liegen übereinander. Bei symmetrischer Regelung und Absaugung in der Mitte zeigen sich keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Regelungen. Weder bei der PI-/PID-Regelung noch bei der „schrittweisen Berechnung der Anzahl SV“ werden Strahlventilatoren benötigt, da keine asymmetrischen Stördrücke auftreten.

Tab. 10.3 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	≈ 0.5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 0.5 min
PID	≈ 0.5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 0.5 min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	≈ 0.5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 0.5 min

Tab. 10.3 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.2 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 10.4 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen.

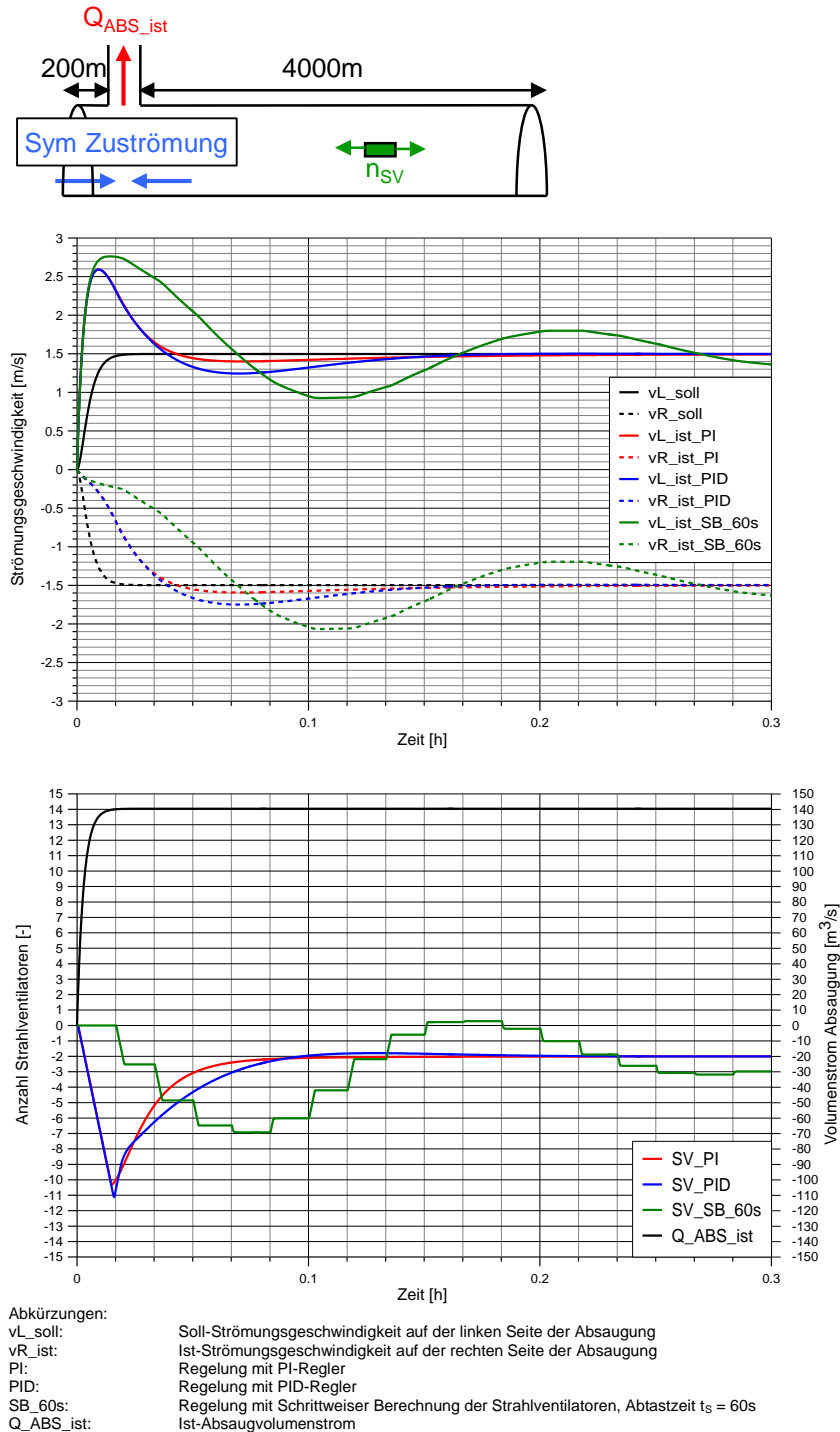


Abb. 10.4 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen

Tab. 10.4 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	< 0.5 min	≈ 1.1 m/s ≈ 75%	≈ 2 min
PID	< 0.5 min	≈ 1.1 m/s ≈ 75%	≈ 6 min
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60s$ )	≈ 0.5 min	≈ 1.3 m/s ≈ 90%	≈ 15 min

Tab. 10.4 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.3 Symmetrische Regelung mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 10.5 zeigt die Simulation der Symmetrischen Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen.

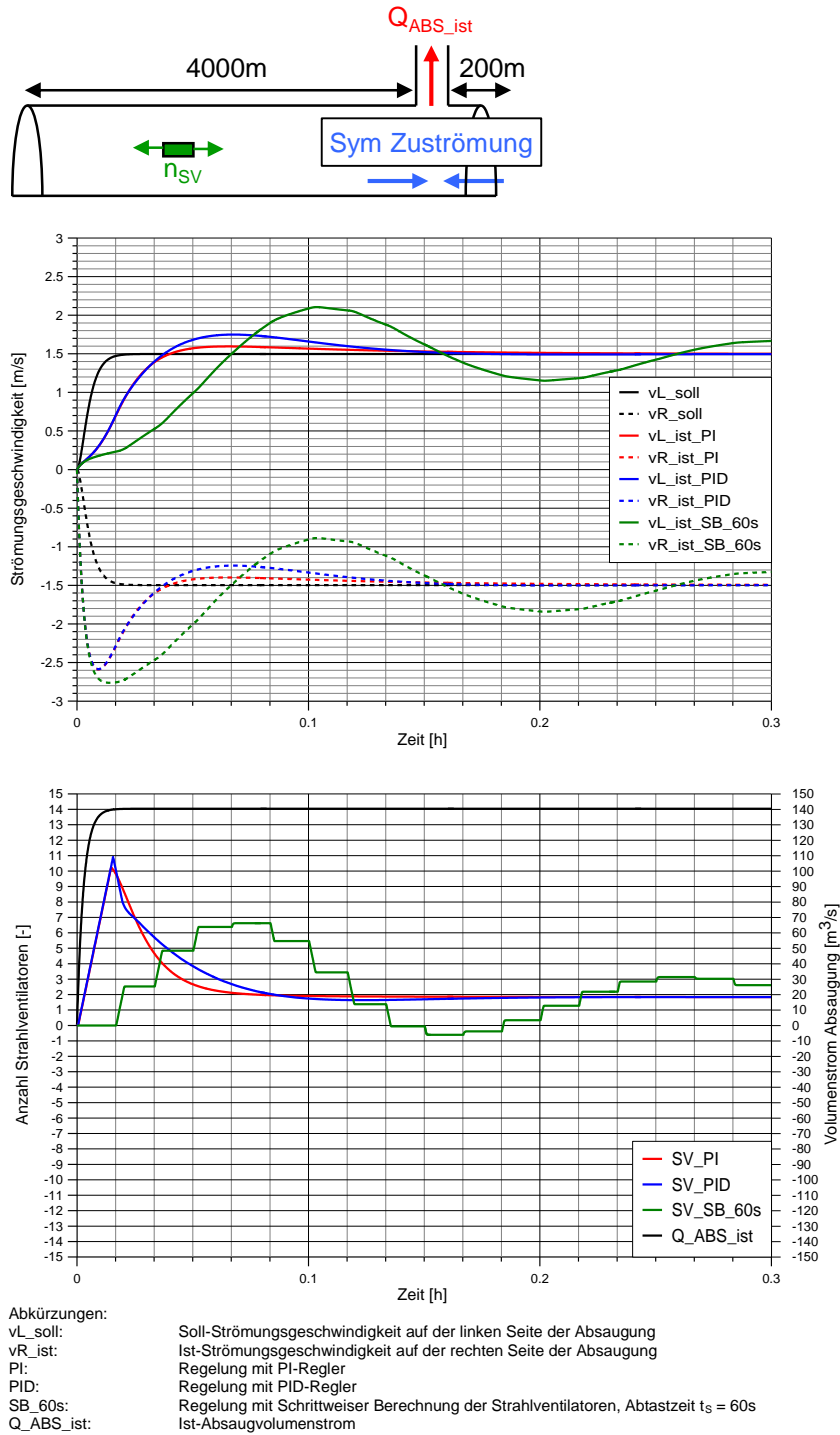


Abb. 10.5 Symmetrische Regelung bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen

Tab. 10.5 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen.

Sym. Regelung	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	≈ 2 min	≈ 0.1 m/s < 10%	≈ 2 min
PID	≈ 2 min	≈ 0.25 m/s < 20%	≈ 5 min
SB der SV $t_s=60s$	≈ 4 min	≈ 0.6 m/s ≈ 40%	≈ 15 min

Tab. 10.5 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Symmetrischer Regelung des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.4 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung in der Mitte des Tunnels

Abb. 10.6 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels (bei 2100m) mit verschiedenen Regelungen.

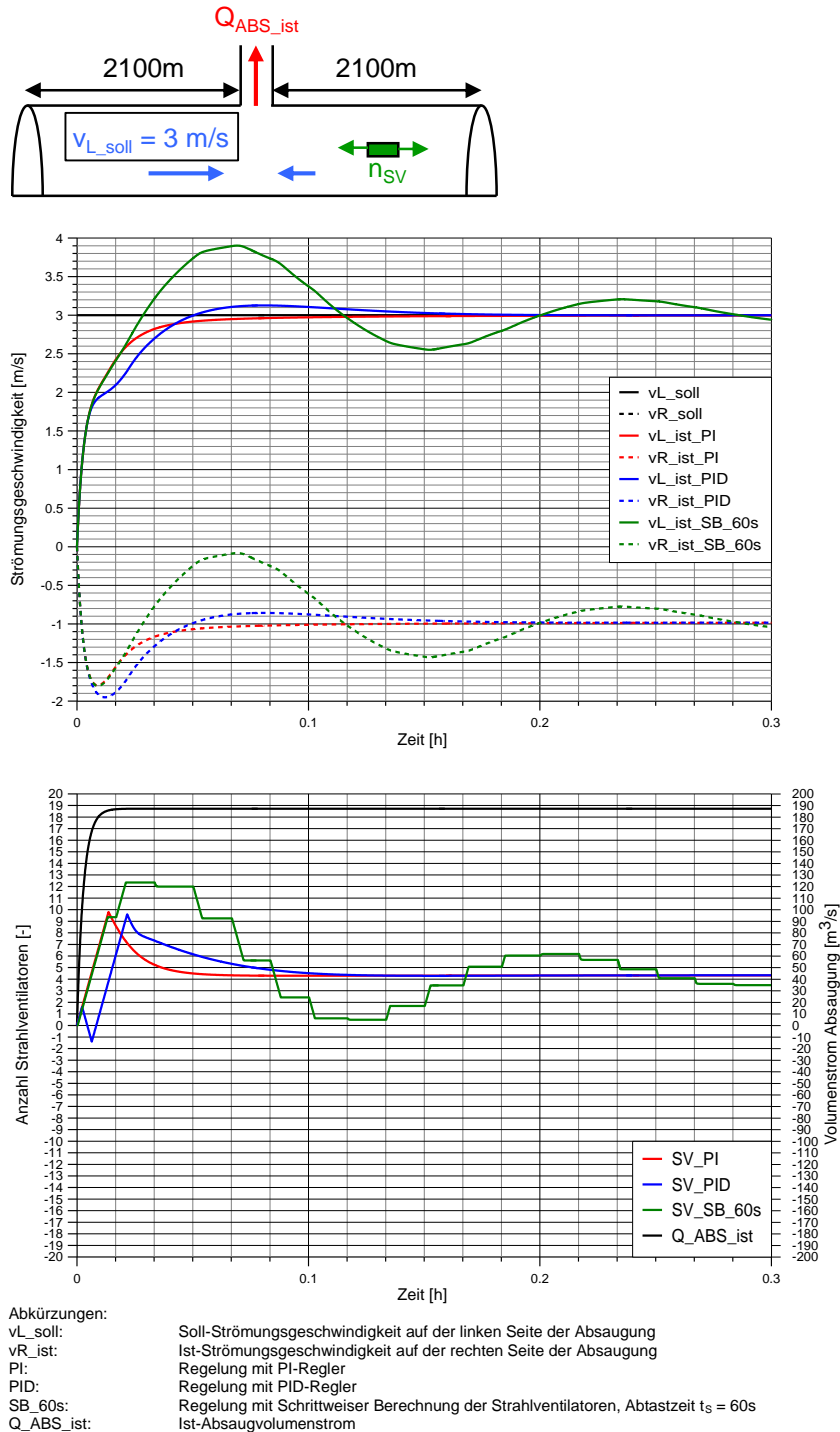


Abb. 10.6 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen

Tab. 10.6 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen.

Regelung $v_{L\text{ soll}} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0 \text{ m/s}$ $\approx 0\%$	$\approx 2 \text{ min}$
PID	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.1 \text{ m/s}$ $\approx 5\%$	$\approx 2 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	$\approx 2 \text{ min}$	$\approx 0.9 \text{ m/s}$ $\approx 30\%$	$\approx 11 \text{ min}$

Tab. 10.6 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung in der Mitte des Tunnels mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.5 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab linkem Portal

Abb. 10.7 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen.

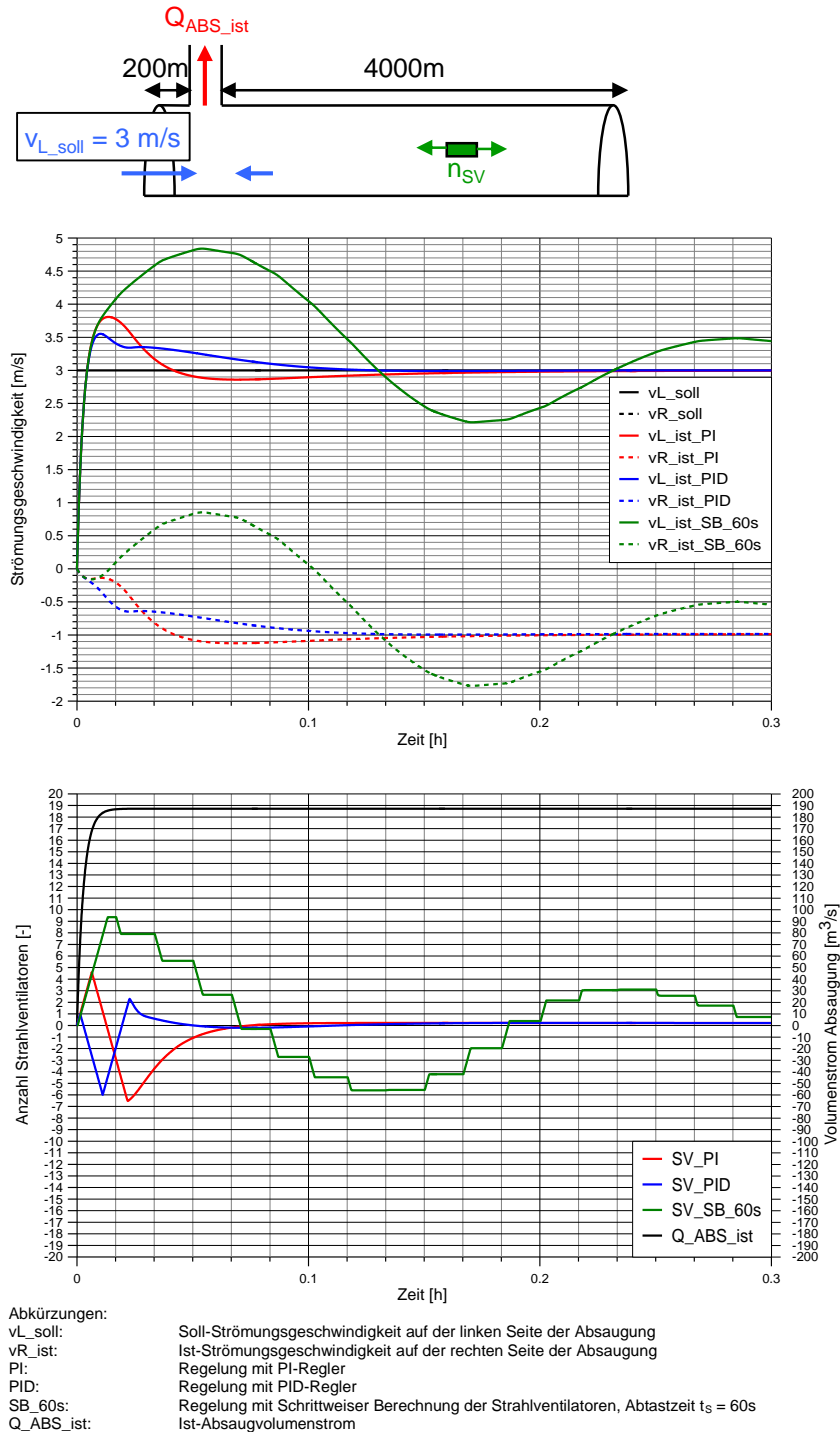


Abb. 10.7 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen

Tab. 10.7 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen.

Regelung $v_{L\text{ soll}} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	< 0.5 min	$\approx 0.8 \text{ m/s}$ $\approx 25\%$	$\approx 2 \text{ min}$
PID	< 0.5 min	$\approx 0.6 \text{ m/s}$ $\approx 20\%$	$\approx 3 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	< 0.5 min	$\approx 1.8 \text{ m/s}$ $\approx 60\%$	> 15 min

Tab. 10.7 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab linkem Portal mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.6 Regelung von $v_L$ auf 3 m/s mit Absaugung 200m ab rechtem Portal

Abb. 10.8 zeigt die Simulation der Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen.

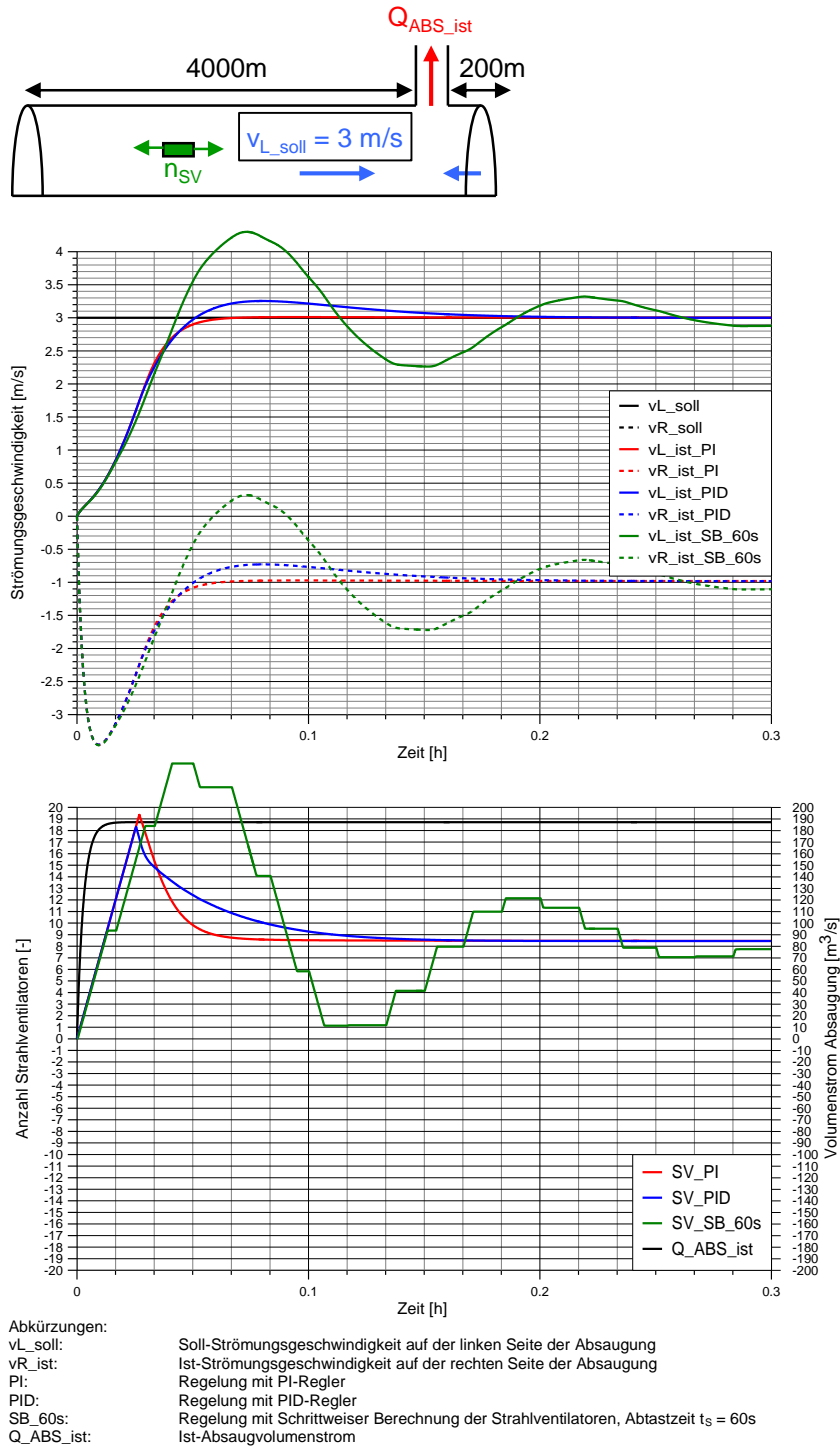


Abb. 10.8 Regelung von  $v_L$  bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen

Tab. 10.8 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen.

Regelung $v_{L, \text{soll}} = 3 \text{ m/s}$	Anstiegszeit $T_{R90\%}$ $v_L$	Überschwingung $\Delta v_L$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$ $v_L$
PI	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 0 \text{ m/s}$ $< 0\%$	$\approx 2.5 \text{ min}$
PID	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 0.3 \text{ m/s}$ $< 10\%$	$\approx 2.5 \text{ min}$
SB der SV (Abtastzeit $t_s=60\text{s}$ )	$\approx 2.5 \text{ min}$	$\approx 1.5 \text{ m/s}$ $\approx 50\%$	$\approx 11 \text{ min}$

Tab. 10.8 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit der Geschwindigkeit Links ( $v_L$ ) bei Regelung von  $v_L$  des Systems ABS bei Absaugung 200m ab rechtem Portal mit verschiedenen Regelungen

### 10.2.7 Schlussfolgerung Vergleich Regelungen des Systems ABS

Die symmetrische Regelung beim System mit Absaugung hängt entscheidend vom Absaugort ab. Bei Absaugung in der Mitte hat die Regelung wenig bis nichts zu tun. Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die Asymmetrie ausgleichen.

Die „Schrittweise Berechnung der Anzahl SV“ ist in allen Belangen schlechter als die PI-/PID-Regelung:

- Zum Teil längere Anstiegszeit
- Grössere Überschwingung
- Längere Einschwingzeit
- Zum Teil Strömungsumkehr der Strömungsgeschwindigkeit rechts  $v_R$

Der PI-Regler hat gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile

- Kleinere Überschwingung
- Nur 2 Parameter

# 11 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

## 11.1 Schlussfolgerungen

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Regelungen zeigt folgendes:

MPC-Regelung:

- Die MPC-Regelung ist schneller als alle anderen Regelungen.
- Die MPC-Regelung ist relativ aufwändig
- Es müssen viele Parameter bestimmt werden
- Nicht jede Simulationssoftware verfügt über MPC-Regelung
- Bei Absaugung muss der Ort der Absaugung in das interne Modell einfließen

PI- und PID-Regelung:

- Sie ist nicht ganz so schnell wie die MPC-Regelung
  - Ähnliche Anstiegszeit wie MPC-Regelung
  - Ähnliche Überschwingung wie MPC-Regelung
  - Längere Einschwingzeit wie MPC-Regelung
- Sie ist jedoch viel schneller als die „Schrittweise Berechnung der SV“, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung
- PI- und PID-Regler sind unabhängig vom Ort der Absaugung
- Praktisch in jeder Simulationssoftware sind PI- und PID-Regler vorhanden. Und wenn nicht können sie sehr schnell aus mathematischen Bausteinen modelliert werden.
- Der Einbezug des D-Anteils beim PID-Regler kann bei realen Eingangssignalen zu Problemen führen.
- Der PI-Regler hat gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile
  - Kleinere Überschwingung
  - Nur 2 Parameter

„Schrittweise Berechnung der zu schaltenden SV“ (Modellbasierte Regelung):

- Die „Schrittweise Berechnung der Anzahl SV“ ist in allen Belangen schlechter als die MPC- und die PI-/PID-Regelung, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung:
  - Zum Teil längere Anstiegszeit
  - Grössere Überschwingung
  - Längere Einschwingzeit
  - Beim System mit Absaugung zum Teil Strömungsumkehr der Strömungsgeschwindigkeit  $v_R$
- Es gibt kein gutes „Rezept“ für die Wahl der Abtastzeit
- Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit der Regelung dar:
  - Bei grösseren Abtastzeiten ist die Überschwingung kleiner und das System schwingt schneller ein. Dafür dauert die Anstiegszeit länger
  - Bei kleineren Abtastzeiten ist die Anstiegszeit kürzer. Dafür ist die Überschwingung grösser und das System schwingt länger.

Symmetrische Regelung beim System mit Absaugung:

Die Symmetrische Regelung hängt entscheidend vom Absaugort ab:

- Bei Absaugung in der Mitte hat die Regelung wenig bis nichts zu tun (solange keine asymmetrischen Stördrücke vorhanden sind, z.B. Auftrieb oder meteorologische Drücke)
- Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die Asymmetrie ausgleichen.

## 11.2 Empfehlungen

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall wird empfohlen, standardmässig PI-Regler mit Anti-Windup zu verwenden. Aufgrund der einfachen Struktur, der geringen Anzahl Parameter, der Unabhängigkeit vom Brandort und der guten Regelleistung überwiegen die Vorteile gegenüber der MPC-Regelung. Aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren in Tunneln ist ein Anti-Windup unerlässlich.

In den Simulationen hat die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“ die deutlich schlechteste Regelungsqualität erzielt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass mit einer objektspezifischen Optimierung der „Schrittweisen Berechnung“ ein besseres Verhalten erreicht werden kann.

Gegen die Verwendung von MPC-Reglern sprechen praktische Aspekte: So ist die Verfügbarkeit von MPC-Bausteinen in Simulationssoftware und in der SPS-Programmierung nicht immer gegeben. Zudem führt die Komplexität des MPC-Reglers zu neuen Unsicherheiten und damit Risiken.

Unabhängig vom verwendeten Regler ist für eine schnelle Regelung entscheidend, dass genügend Lüfterkapazität vorhanden ist. Die Anzahl Strahlventilatoren während der Regelung übersteigt die Anzahl der Strahlventilatoren am Ende der Regelung bei weitem.

Die Tunnellüftung wird in der Regel für einen stationären Zustand ausgelegt. Im worst-case Szenario wird dann möglicherweise die Regelung aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren verlangsamt.

Es sollte überlegt werden, ob bei der Dimensionierung der Tunnellüftung zusätzliche Strahlventilatoren für die Regelung eingeplant werden sollen.

In den Simulationen wurde vereinfachend angenommen, dass gebrochene Zahlen an Strahlventilatoren geschaltet werden können. Für Tunnel, bei welchen die Strahlventilatoren mit Frequenzumformern angesteuert werden, ist das auch realistisch. Bei Tunneln mit direkt angesteuerten Strahlventilatoren können jedoch immer nur ganze Zahlen geschaltet werden. Je nachdem ob wenig grosse oder viele kleine Strahlventilatoren eingebaut sind, kann nicht mehr fein geregelt werden. Besonders bei grossen Strahlventilatoren kann die Qualität der Regelung verbessert werden, wenn zumindest ein Teil der Strahlventilatoren mit Frequenzumformer angesteuert wird.

### 11.3 Mögliche Weiterführung des Forschungsprojekts

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind überwiegend theoretisch. In der Theorie funktioniert der PI-Regler besser als die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“. Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts sollte die Theorie in der Praxis (an einem realen Tunnel) umgesetzt und getestet werden. In der Praxis kommen viele Probleme hinzu, welche in der Theorie vernachlässigt oder vereinfacht wurden.

Ein grosses Problem in der Praxis ist die Plausibilität der Strömungsmessung. Wie soll die Regelung reagieren, falls während des Regelungsprozesses die Plausibilität der Strömungsmessung nicht mehr gegeben ist?

Bei direkt angetriebenen Strahlventilatoren können nur ganze Zahlen geschaltet werden. Falls ein Regler aber eine gebrochene Anzahl Strahlventilatoren verlangt, so führt das im eingeregelter Zustand zu wiederholtem Ein- und Ausschalten von einem oder mehreren Strahlventilatoren. Sind die Abstände für das Ein- und Ausschalten zu kurz, kann das zu einer Überlastung und somit zur Abschaltung von Strahlventilatoren führen. Diese Problematik sollte weiter untersucht und steuerungstechnisch gelöst werden.

Die Regelungsproblematik bei direkt angetriebenen Strahlventilatoren wirft die Frage auf, ob nicht grundsätzlich Frequenzumformer für die Ansteuerung verwendet werden sollen. Bei Tunneln mit grossen Strahlventilatoren und einer eher geringen Anzahl werden bereits heute Frequenzumformer eingesetzt.

## 12 Rezept für eine robuste (PI-) Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung

Im Folgenden wird ein Rezept beschrieben um eine Robuste (PI-) Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung herzuleiten.

Als Regler soll ein PI-Regler mit Anti-Windup eingesetzt werden.

Für die Regelung der Längslüftung mit einem PI- oder PID-Regler eignen sich die Einstellparameter nach Ziegler/Nichols. Die Regelparameter werden nach der Sprungantwortmethode nach Ziegler/Nichols hergeleitet.

Um diese Regelparameter zu bestimmen, müssen folgende Parameter des Systems bekannt sein:

- Wirkungskonstante  $b_T$  eines Strahlventilators im Tunnel
- Totzeit  $T_{TZ}$  der Regelstrecke

### 12.1 Systemparameter

#### 12.1.1 Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel

Um die Wirkungskonstante  $b_T$  eines Strahlventilators im Tunnel herzuleiten, müssen folgende Systemparameter bekannt sein.

Parameter	Beschreibung
L	Länge des Tunnels
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels
$\rho$	Dichte der Luft
$A_{SV}$	Querschnittsfläche der Strahlventilatoren
$\Delta F_{1SV\_stand}$	Standschub eines Strahlventilatoren
$k_{SV}$	Einbaufaktor der Strahlventilatoren

Tab. 12.1 Benötigte Systemparameter für Regelparameter nach Ziegler/Nichols

Für die Ausblasgeschwindigkeit der SV gilt:

$$v_{SV} = \sqrt{\frac{\Delta F_{1SV\_stand}}{\rho \cdot A_{SV}}} \quad 12-1$$

Mit:

$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$\Delta F_{1SV\_stand}$	Standschub eines Strahlventilators	[N]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]

Für die Wirkungskonstante  $b_T$  eines Strahlventilators im Tunnel gilt dann:

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot k_{SV} \cdot A_T} = \frac{\Delta F_{1SV\_stand}}{L \cdot \rho \cdot k_{SV} \cdot A_T} \quad 12-2$$

Mit:

$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
L	Länge des Tunnels	[m]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]

### 12.1.2 Totzeit der Regelstrecke durch Sprungantwortversuch

Für die Bestimmung der Totzeit der Regelstrecke sollte im realen Tunnel ein Sprungantwortversuch durchgeführt werden:

- Zur Zeit  $t < 0$  sind alle Strahlventilatoren ausgeschaltet
- Zum Zeitpunkt  $t = 0$  werden alle SV eingeschaltet
- Für die Zeit  $t > 0$  wird der resultierende Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit gemessen

Abb. 12.1 zeigt den qualitativen Verlauf eines solchen Sprungantwortversuchs.

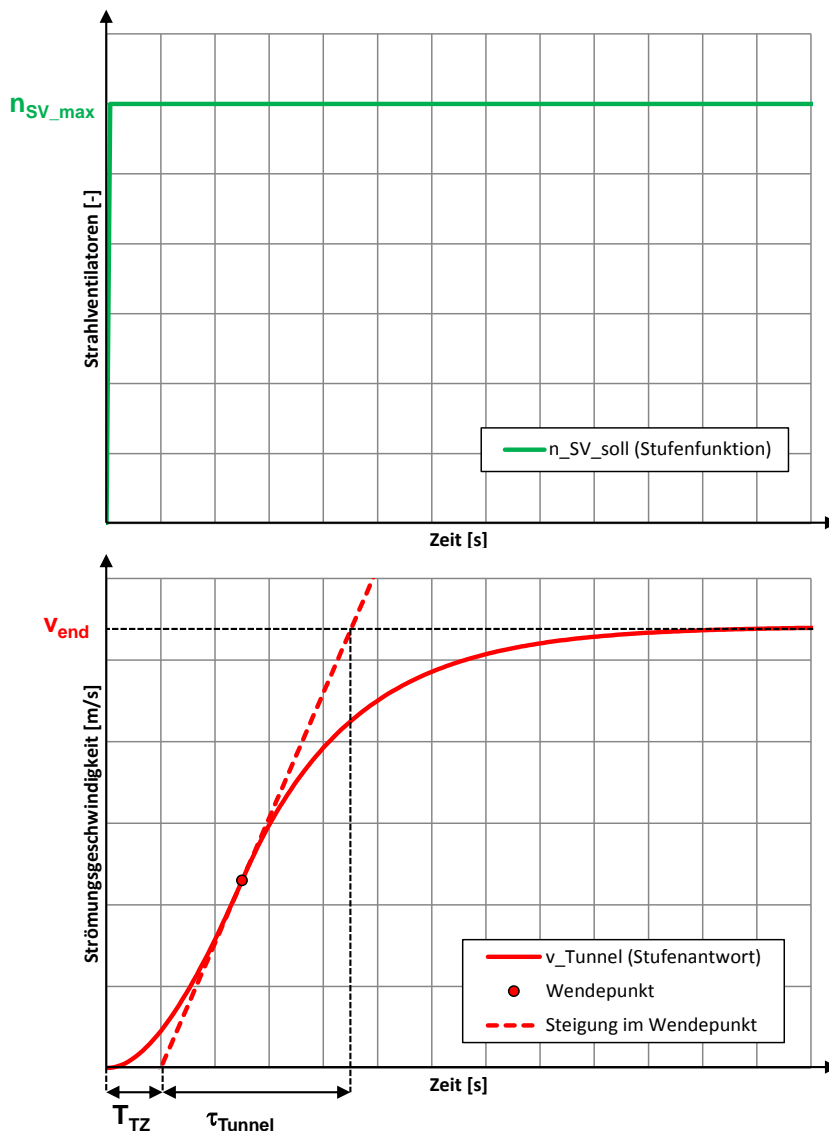


Abb. 12.1 Sprungantwort mit Wendetangente zur Bestimmung von  $T_{TZ}$  und  $\tau_{Tunnel}$

Mit der Sprungantwort der Regelstrecke können folgende Parameter bestimmt werden:

- Statische Verstärkung  $K = v_{end}/n_{SV}$
- Zeitkonstante des Tunnels  $\tau_{Tunnel}$
- Totzeit des Systems  $T_{TZ}$

In Kapitel 7.4.2 hat sich gezeigt, dass für die Einstellregeln nach Ziegler/Nichols (angewendet auf das System Tunnel) nur die Totzeit  $T_{TZ}$  benötigt wird.

### 12.1.3 Totzeit der Regelstrecke durch Abschätzung

Liegt kein Sprungantwortversuch des realen Tunnels vor, so kann die Totzeit des Systems abgeschätzt werden.

Die Totzeit der Regelstrecke setzt sich hauptsächlich aus 3 Totzeiten zusammen:

- Totzeit durch die verzögerte Einschaltung aller Strahlventilatoren (SV-Rampe)
- Totzeit der Strahlventilatorodynamik
- Totzeit der Strömungsmessung

Die Totzeit der Strahlventilatoren kann näherungsweise der Zeitkonstante der Strahlventilatorodynamik gleichgesetzt werden. Diese beträgt in der Regel einige Sekunden (üblicherweise ca. 5 s).

Die Totzeit der Filterung der Strömungsmessung kann näherungsweise der Zeitkonstante der Messung gleichgesetzt werden (im Brandfall üblicherweise ca. 10 s).

Um die Totzeit durch die verzögerte Einschaltung aller Strahlventilatoren (SV-Rampe) herzuleiten, müssen folgende Systemparameter bekannt sein.

Parameter	Beschreibung
$n_{SV\_max}$	Maximale Anzahl Strahlventilatoren
$\tau_{SV}$	Zeitkonstante Strahlventilator
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit zwischen dem Einschalten mehrerer Strahlventilatoren
$\tau_{mess}$	Zeitkonstante Strömungsmessung
$\kappa_p$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels

Tab. 12.2 Benötigte Systemparameter für die Herleitung der Totzeit durch verzögerte Einschaltung aller SV

Für die Konstanten  $a_{T\_Leer}$  und  $b_T$  gilt:

$$a_{T\_Leer} = \frac{\left( \kappa_{PL} + \frac{\lambda \cdot L}{D_{hyd}} + \kappa_{PR} \right)}{2 \cdot L} \quad 12-3$$

$$b_T = \frac{A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{L \cdot \kappa_{SV} \cdot A_T} \quad 12-4$$

Mit:

$a_{T\_Leer}$	Widerstandskonstante des leeren Tunnels	[1/m]
$\kappa_p$	Ein-/Ausströmverlustkoeffizient des Portals	[-]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$L$	Länge des Tunnels	[m]
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]

Für die maximale Zeitdauer der Einschalt-Rampe  $T_{R\_max}$  der SV gilt:

$$T_{R\_max} = n_{SV\_max} \cdot T_{SV\_SZ} \quad 12-5$$

Mit:

$T_{R\_max}$	Maximale Zeitdauer der Einschalt-Rampe der SV	[s]
$n_{SV\_max}$	Maximale Anzahl Strahlventilatoren	[-]
$T_{SV\_SZ}$	Schaltzeit zwischen dem Einschalten mehrerer Strahlventilatoren	[s]

Für die minimale Zeitkonstante des leeren Tunnels gilt:

$$\tau_{T\_min} = \frac{1}{\sqrt{a_{T\_Leer} \cdot b_T \cdot n_{SV\_max}}} \quad 12-6$$

Mit:

$\tau_{T\_min}$	Minimale Zeitkonstante des leeren Tunnels	[s]
-----------------	---	-----

Für die maximale Totzeit der Rampenantwort  $T_{R\_TZ\_max}$  gilt somit:

$$T_{R\_TZ\_max} = \frac{\tau_{T\_min} - (T_{R\_max} + \tau_{T\_min}) \cdot e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}}{\left(1 - e^{-\frac{T_{R\_max}}{\tau_{T\_min}}}\right)} \quad 12-7$$

Mit:

$T_{R\_TZ\_max}$	Maximale Totzeit der Rampenantwort	[s]
------------------	------------------------------------	-----

Die gesamte Totzeit der Regelstrecke wird aus der Summe der Totzeiten des Strahlventilators  $T_{SV\_TZ}$ , der Messung  $T_{mess\_TZ}$  und der maximalen Totzeit durch die Rampenantwort  $T_{R\_TZ\_max}$  genommen.

$$T_{TZ} = T_{SV\_TZ} + T_{mess\_TZ} + T_{R\_TZ\_max} \quad 12-8$$

Mit:

$T_{TZ}$	Gesamte Totzeit der Regelstrecke	[s]
$T_{SV\_TZ}$	Totzeit der Strahlventilatorodynamik	[s]
$T_{mess\_TZ}$	Totzeit der Messfilterung	[s]
$T_{R\_TZ\_max}$	Maximale Totzeit der Rampenantwort	[s]

## 12.2 Einstellparameter nach Ziegler/Nichols

Für die Verstärkung des P-Reglers nach Ziegler/Nichols ergibt sich:

$$K_{P,P} = \frac{\tau}{K \cdot T_{TZ}} = \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}} \tag{12-9}$$

Mit:

$K_{P,P}$	Verstärkung des P-Reglers	[s/m]
$b_T$	Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$T_{TZ}$	Totzeit des Systems	[s]

Der Parameter des P-Anteils ist nur von der Konstante  $b_T$  (Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel) und von der gesamten Totzeit des Systems  $T_{TZ}$  abhängig.

Für die Einstellregeln nach Ziegler/Nichols gilt:

Regler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P-Regler	$K_{P,P} = 1 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$		
PI-Regler	$K_{PI,P} = 0.9 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$	$T_{PI,I} = 3.33 \cdot T_{TZ}$	
PID-Regler	$K_{PID,P} = 1.2 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}}$	$T_{PID,I} = 2 \cdot T_{TZ}$	$T_{PID,D} = 0.5 \cdot T_{TZ}$

Tab. 12.3 Einstellregeln nach Ziegler/Nichols für das System Tunnel

## 12.3 Wahl des Reglers

Als Regler wird ein PI-Regler mit Anti-Windup gewählt.

Aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren muss auf jeden Fall ein Anti-Windup in den Regler eingebaut werden.

Abb. 12.2 zeigt das Signalflussbild eines PI-Reglers mit Anti-Windup in der Standardform.

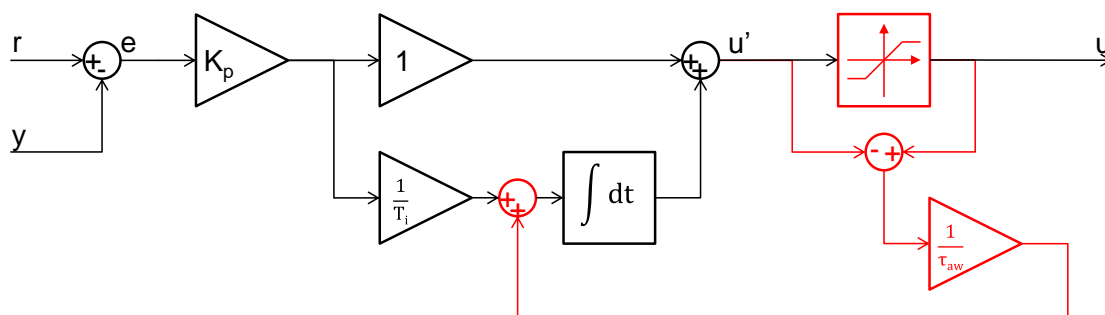


Abb. 12.2 Signalflussbild eines PI-Reglers mit Anti-Windup in der Standardform

Für die Regelparameter des PI-Reglers ergibt sich nach Ziegler/Nichols:

$$K_{PI,P} = 0.9 \cdot \frac{1}{b_T \cdot T_{TZ}} \quad 12-10$$

$$T_{PI,I} = 3.33 \cdot T_{TZ} \quad 12-11$$

Mit:

$K_{PI,P}$  Verstärkung des PI-Reglers [s/m]

$T_{PI,I}$  Nachstellzeit des I-Anteils des PI-Reglers [s]

$b_T$  Wirkungskonstante eines Strahlventilators im Tunnel [m/s<sup>2</sup>]

$T_{TZ}$  Totzeit des Systems [s]

Für den Anti-windup hat sich folgende Zeitkonstante als geeignet erwiesen:

$$T_{PID_{aw}} = T_{PI_{aw}} = 5 \text{ s} \quad 12-12$$

Mit:

$T_{PI_{aw}}$  Zeitkonstante des Anti-Windup [s]

## 12.4 Regelungskreis für das System Längslüftung

Beim System Längslüftung wird auf eine Soll-Geschwindigkeit geregelt.

Abb. 12.3 zeigt den Regelungskreis mit PI-Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalflussbild.

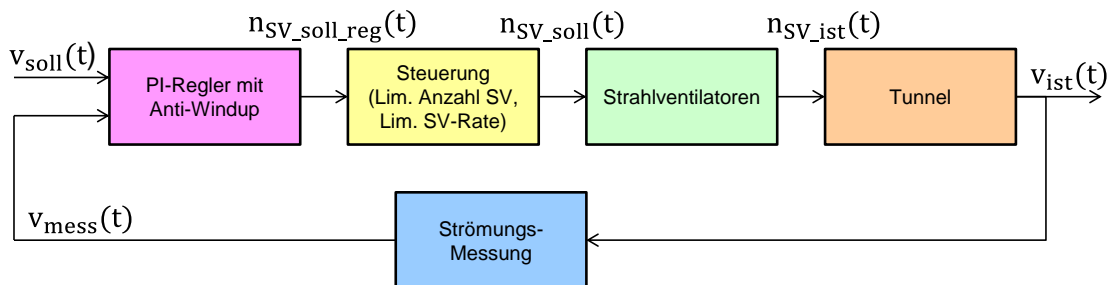


Abb. 12.3 Regelungskreis des Systems mit Längslüftung: PI-Regler, Limitierte SV-Einschaltrate, Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

## 12.5 Regelungskreis für das System Absaugung mit Symmetrischer Regelung

Beim System Absaugung mit Symmetrischer Regelung wird auf eine symmetrische Anströmung zur Absaugstelle hin geregelt.

Abb. 12.4 zeigt den Regelungskreis mit PI-Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalfussbild.

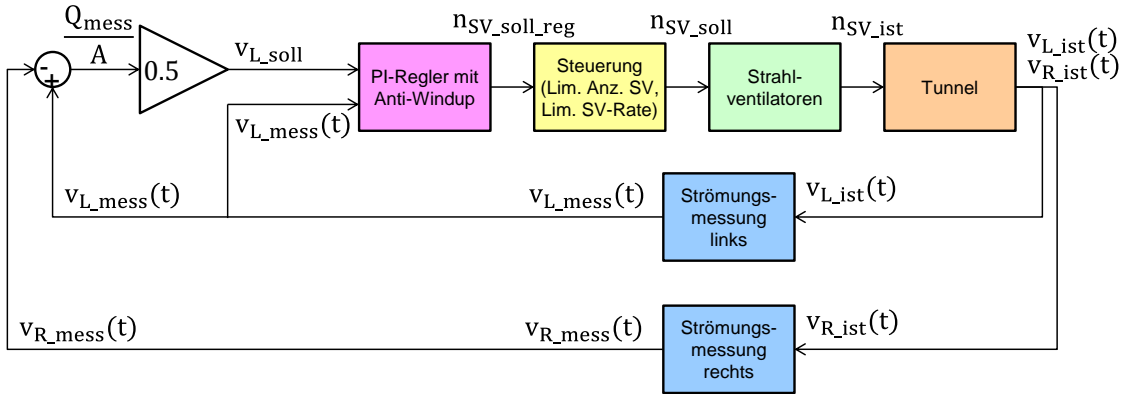


Abb. 12.4 Regelungskreis des Systems mit Absaugung mit Symmetrischer Regelung: PI-Regler, Steuerung (Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

## 12.6 Regelungskreis für das System Absaugung mit Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit

Beim System Absaugung mit Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit wird die linke Strömungsgeschwindigkeit geregelt.

Abb. 12.5 zeigt den Regelungskreis mit PI-Regler, Steuerung (SV-Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie der Messfilterung im Signalfussbild.

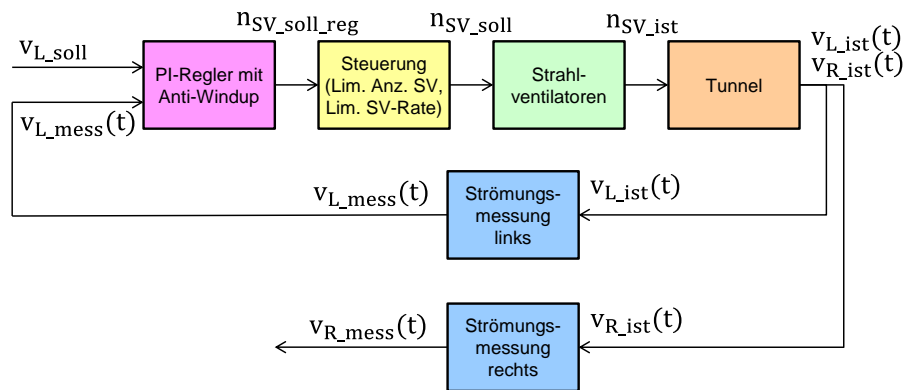


Abb. 12.5 Regelungskreis des Systems mit Absaugung mit Regelung der linken Strömungsgeschwindigkeit: PI-Regler, Steuerung (Rampe), Strahlventilator, Tunnel sowie Messfilterung

## 13 Sensibilitätsanalyse

### 13.1 Variation der Totzeiten für die Herleitung der Parameter

Für den Gotschnatunnel wurde die folgende Totzeit  $T_{TZ}$  hergeleitet:

$$T_{TZ} = T_{SV\_TZ} + T_{mess\_TZ} + T_{R\_TZ\_max} \approx 65.4 \text{ s} \quad 13-1$$

Für die Herleitung der einzelnen Totzeiten wurden einige Annahmen getroffen und Näherungen verwendet. Um den Einfluss der Totzeit zu überprüfen, werden zusätzlich folgende Totzeiten getestet:

$$T_{TZ\_0.5} = 0.5 \cdot T_{TZ} = 32.7 \text{ s} \quad 13-2$$

$$T_{TZ\_0.75} = 0.75 \cdot T_{TZ} = 49.1 \text{ s} \quad 13-3$$

$$T_{TZ\_1.5} = 1.5 \cdot T_{TZ} = 98.1 \text{ s} \quad 13-4$$

$$T_{TZ\_2} = 2 \cdot T_{TZ} = 130.9 \text{ s} \quad 13-5$$

Aus den verschiedenen Totzeiten werden die entsprechenden Regelparameter nach Ziegler/Nichols hergeleitet:

	$T_{TZ\_0.5}$	$T_{TZ\_0.75}$	$T_{TZ\_1}$	$T_{TZ\_1.5}$	$T_{TZ\_2}$
$K_{PI\_P}$	16.9 [s/m]	11.3 [s/m]	8.5 [s/m]	5.6 [s/m]	4.2 [s/m]
$T_{PI\_I}$	108.9 [s]	163.4 [s]	217.9 [s]	326.8 [s]	435.7 [s]

Tab. 13.1 Parameter für PI-Regler nach Ziegler/Nichols für verschiedene Totzeiten

### 13.1.1 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit verschiedenen Totzeiten

Abb. 13.1 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Verwendung von verschiedenen Totzeiten.

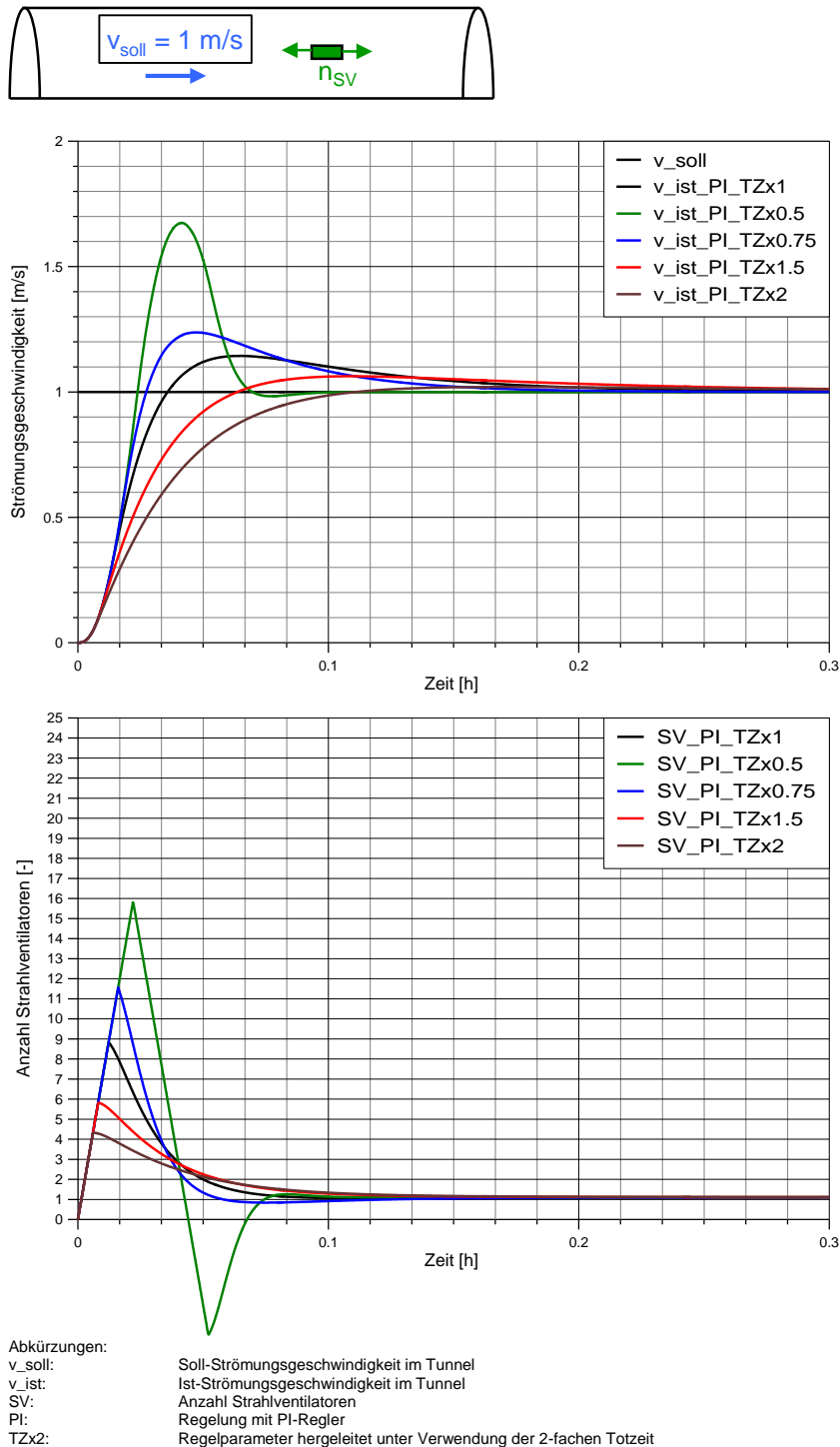


Abb. 13.1 PI-Regelung des Systems Längslüftung auf 1 m/s und Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten

Tab. 13.2 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI ( $T_{TZ_{0.5}}$ )	$\approx 1.5$ min	$\approx 0.7$ m/s $\approx 70\%$	$\approx 4$ min
PI ( $T_{TZ_{0.75}}$ )	$\approx 1.5$ min	$\approx 0.25$ m/s $\approx 25\%$	$\approx 6$ min
PI ( $T_{TZ_{1}}$ )	$\approx 2$ min	$\approx 0.15$ m/s $\approx 15\%$	$\approx 6$ min
PI ( $T_{TZ_{1.5}}$ )	$\approx 3$ min	$\approx 0.05$ m/s $\approx 5\%$	$\approx 3$ min
PI ( $T_{TZ_{2}}$ )	$\approx 4$ min	$\approx 0.01$ m/s $\approx 1\%$	$\approx 4$ min

Tab. 13.2 Anstiegszeit, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten

### 13.1.2 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit verschiedenen Totzeiten

Abb. 13.2 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Verwendung von verschiedenen Totzeiten.

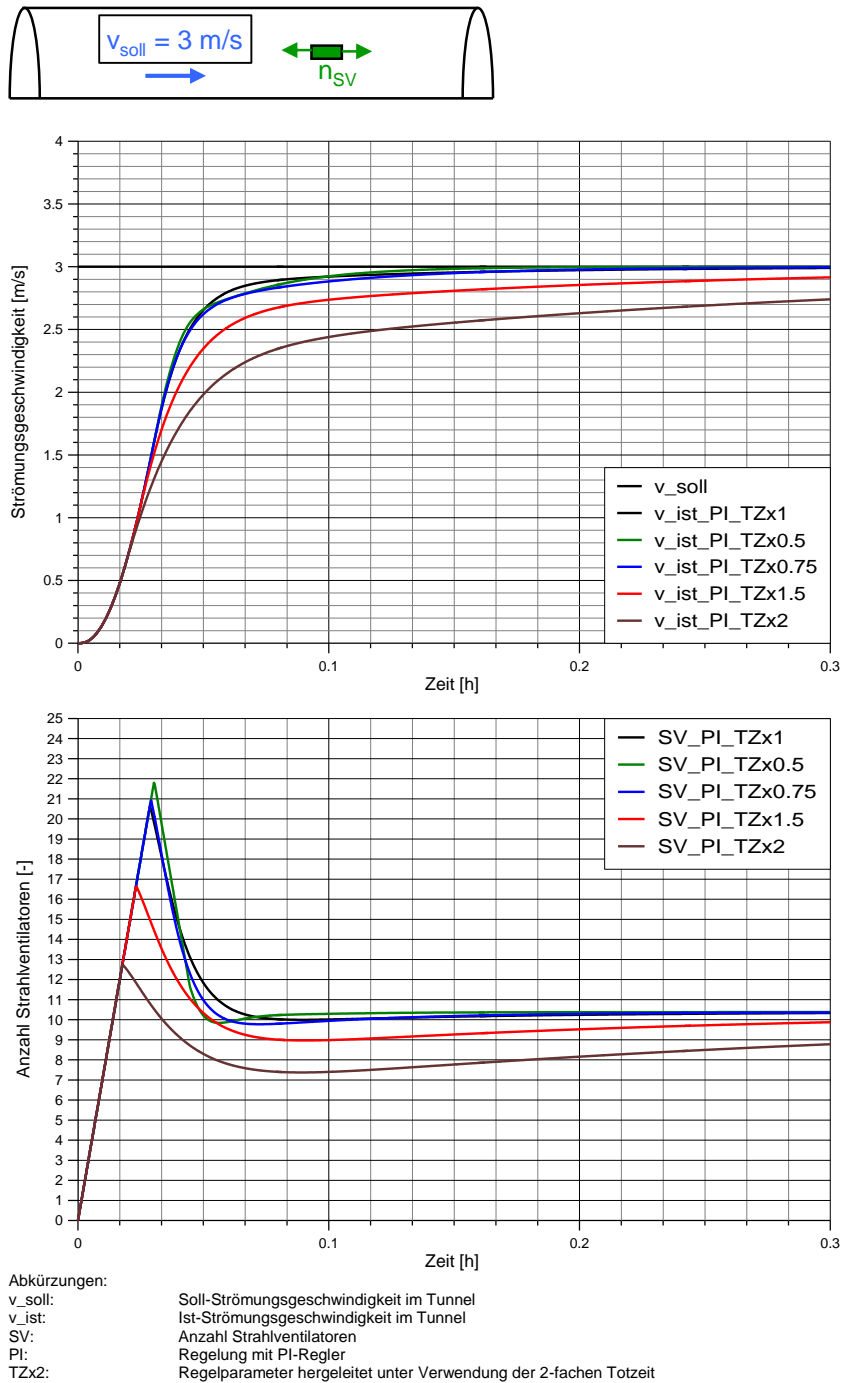


Abb. 13.2 PI-Regelung des Systems Längslüftung auf 3 m/s und Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten

Tab. 13.3 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI ( $T_{TZ_{0.5}}$ )	≈ 3 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 3 min
PI ( $T_{TZ_{0.75}}$ )	≈ 3 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 3 min
PI ( $T_{TZ_{1}}$ )	≈ 3 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 3 min
PI ( $T_{TZ_{1.5}}$ )	≈ 5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 5 min
PI ( $T_{TZ_{2}}$ )	≈ 15 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 15 min

Tab. 13.3 Anstiegszeit, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Verwendung verschiedener Totzeiten

### 13.1.3 Zusammenfassung für die Verwendung verschiedenen Totzeiten

Falls für die Herleitung der Regelparameter eine kürzere Totzeit verwendet wird als die hergeleitete Totzeit, wirkt sich das in folgender Weise auf die Regelung aus:

- Anstiegszeit
  - Bei Regelung auf 1 m/s wird die Anstiegszeit kürzer
  - Bei Regelung auf 3 m/s bleibt die Anstiegszeit gleich
- Überschwingung
  - Bei Regelung auf 1 m/s wird die Überschwingung grösser
  - Bei Regelung auf 3 m/s gibt es keine Überschwingung
- Einschwingzeit
  - Bei Regelung auf 1 m/s wird die Einschwingzeit kürzer
  - Bei Regelung auf 3 m/s bleibt die Einschwingzeit gleich
- Schaltung der Strahlventilatoren
  - Bei Regelung auf 1 m/s werden zu Beginn der Regelung mehr Strahlventilatoren ein- und wieder ausgeschaltet
  - Bei Regelung auf 3 m/s werden etwa gleich viele Strahlventilatoren ein- und wieder ausgeschaltet

Falls für die Herleitung der Regelparameter eine längere Totzeit verwendet wird als die hergeleitete Totzeit, wirkt sich das in folgender Weise auf die Regelung aus:

- Anstiegszeit wird grösser
- Überschwingung
  - Bei Regelung auf 1 m/s wird die Überschwingung kleiner
  - Bei Regelung auf 3 m/s gibt es keine Überschwingung
- Die Einschwingzeit dauert im allgemeinen länger
  - Bei Regelung auf 1 m/s gibt es eine Verkürzung der Einschwingzeit, sobald die Überschwingung unter 10% fällt
  - Bei Regelung auf 3 m/s entspricht die Einschwingzeit der Anstiegszeit. Diese wird länger.
- Zu Beginn der Regelung werden weniger Strahlventilatoren ein- und wieder ausgeschaltet

Besonders bei Regelung auf 1 m/s ist die Verwendung von kürzeren oder längeren Totzeiten ein Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Überschwingung der Regelung.

Insgesamt kann aber gesagt werden, dass die Verwendung der hergeleiteten Totzeit die beste Regelqualität liefert.

## 13.2 Variation der Schaltzeiten der Strahlventilatoren für die Herleitung der Parameter

Für den Gotschnatunnel wurde die folgende Schaltzeit der Strahlventilatoren  $T_{SV\_SZ}$  angenommen:

$$T_{SV\_SZ} = 5 \text{ s} \quad 13-6$$

Um den Einfluss der Schaltzeit der Strahlventilatoren auf die Regelung zu überprüfen, werden zusätzlich folgende Schaltzeiten getestet:

$$T_{SV\_SZ} = 3 \text{ s} \quad 13-7$$

$$T_{SV\_SZ} = 10 \text{ s} \quad 13-8$$

$$T_{SV\_SZ} = 15 \text{ s} \quad 13-9$$

$$T_{SV\_SZ} = 20 \text{ s} \quad 13-10$$

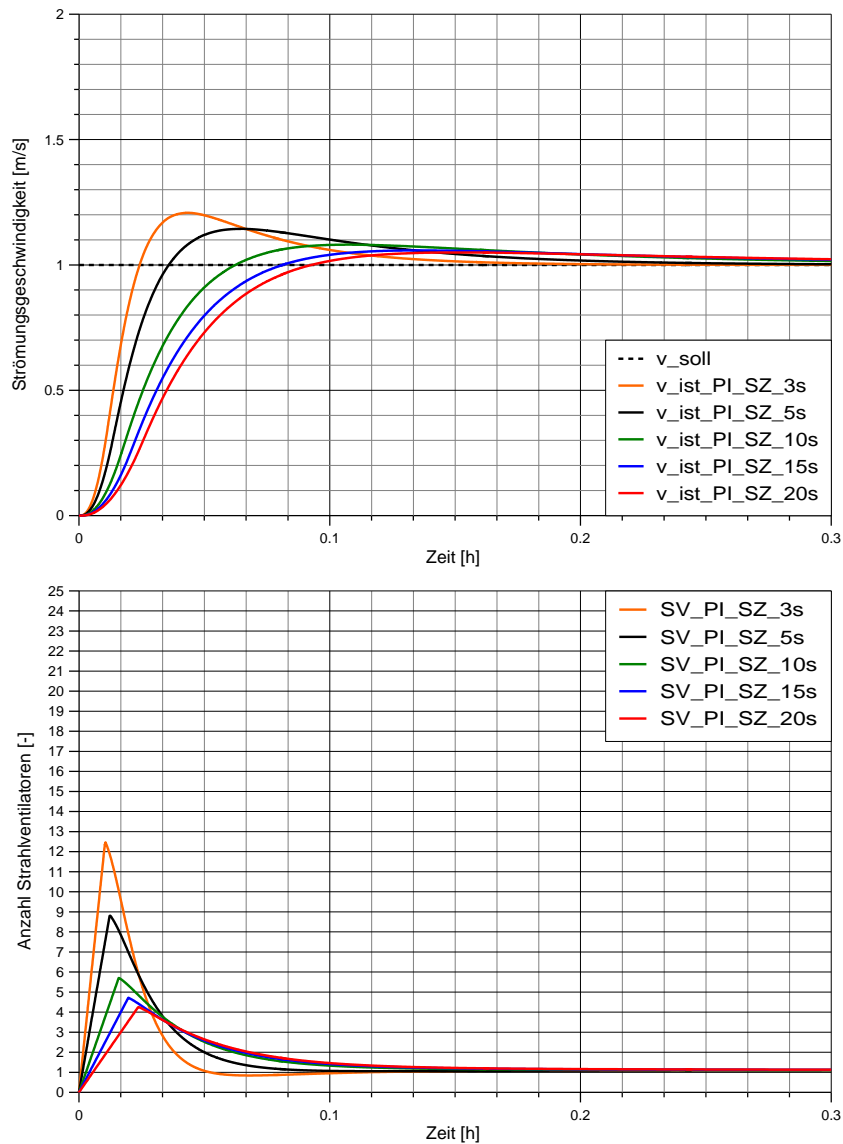
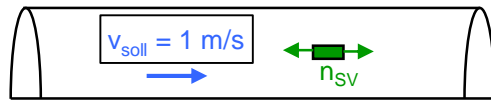
Aus den verschiedenen Schaltzeiten werden die entsprechenden Regelparameter nach Ziegler/Nichols hergeleitet:

	$T_{SV\_SZ\_3}$	$T_{SV\_SZ\_5}$	$T_{SV\_SZ\_10}$	$T_{SV\_SZ\_15}$	$T_{SV\_SZ\_20}$
$K_{PI\_P}$	11.7 [s/m]	8.5 [s/m]	5.6 [s/m]	4.7 [s/m]	4.3 [s/m]
$T_{PI\_I}$	158.2 [s]	217.9 [s]	327.5 [s]	392.4 [s]	427.6 [s]

Tab. 13.4 Parameter für PI-Regler nach Ziegler/Nichols für verschiedene Schaltzeiten der Strahlventilatoren

### 13.2.1 Regelung des Systems LL auf 1 m/s bei verschiedenen Schaltzeiten

Abb. 13.1 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten der Strahlventilatoren.



Abkürzungen:  
 $v_{soll}$ : Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 $v_{ist}$ : Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 SV: Anzahl Strahlventilatoren  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 SZ\_5s: Regelparameter hergeleitet unter Verwendung einer Schaltzeit der Strahlventilatoren von 5 s

Abb. 13.3 PI-Regelung des Systems Längslüftung auf 1 m/s und Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten

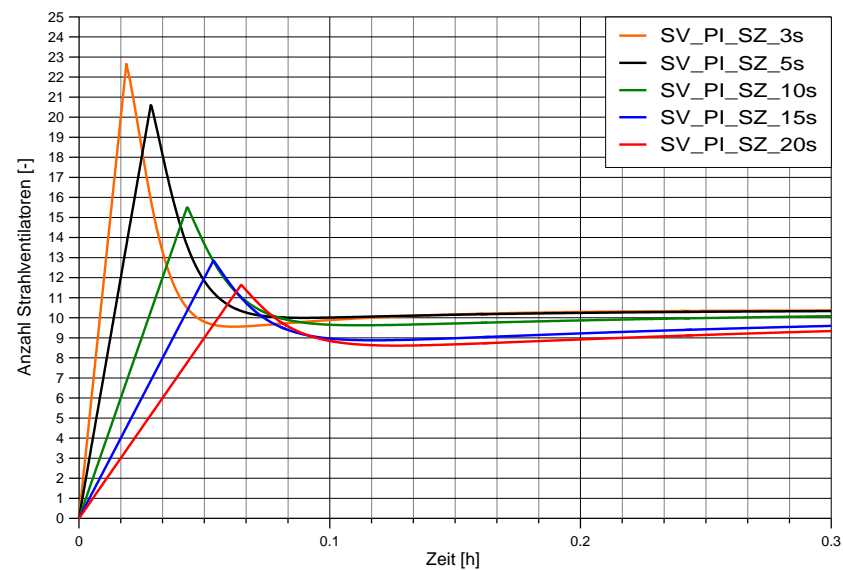
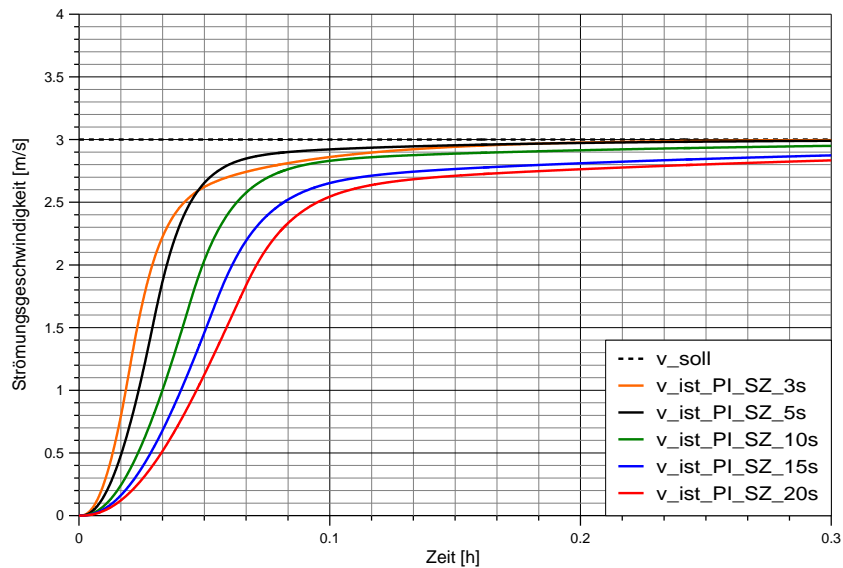
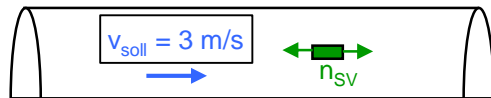
Tab. 13.2 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten der Strahlventilatoren.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI ( $T_{sv\_sz\_3}$ )	≈ 1.5 min	≈ 0.2 m/s ≈ 20%	≈ 5 min
PI ( $T_{sv\_sz\_5}$ )	≈ 2 min	≈ 0.15 m/s ≈ 15%	≈ 6 min
PI ( $T_{sv\_sz\_10}$ )	≈ 3 min	≈ 0.1 m/s ≈ 10%	≈ 3 min
PI ( $T_{sv\_sz\_15}$ )	≈ 3.5 min	≈ 0.05 m/s ≈ 5%	≈ 3.5 min
PI ( $T_{sv\_sz\_20}$ )	≈ 4 min	≈ 0.05 m/s ≈ 5%	≈ 4 min

*Tab. 13.5 Anstiegszeit, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten*

### 13.2.2 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit verschiedenen Schaltzeiten

Abb. 13.2 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten der Strahlventilatoren.



Abkürzungen:

$v_{soll}$ :	Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel
$v_{ist}$ :	Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel
SV:	Anzahl Strahlventilatoren
PI:	Regelung mit PI-Regler
SZ_5s:	Regelparameter hergeleitet unter Verwendung einer Schaltzeit der Strahlventilatoren von 5 s

Abb. 13.4 PI-Regelung des Systems Längslüftung auf 3 m/s und Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten

Tab. 13.3 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten der Strahlventilatoren.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
PI ( $T_{sv\_sz\_3}$ )	≈ 3.5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 3.5 min
PI ( $T_{sv\_sz\_5}$ )	≈ 3 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 3 min
PI ( $T_{sv\_sz\_10}$ )	≈ 4.5 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 4.5 min
PI ( $T_{sv\_sz\_15}$ )	≈ 7 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 7 min
PI ( $T_{sv\_sz\_20}$ )	≈ 9 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 9 min

Tab. 13.6 Anstiegszeit, Überschwingung und Einschwingzeit bei PI-Regelung des Systems LL mit Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols bei verschiedenen Schaltzeiten

### 13.2.3 Zusammenfassung verschiedene Schaltzeiten der Strahlventilatoren

Eine zunehmend längere Schaltzeit der Strahlventilatoren wirkt sich wie folgt auf die Regelung aus:

- Die Anstiegszeit dauert im allgemeinen länger
- Überschwingung
  - Bei Regelung auf 1 m/s wird die Überschwingung kleiner
  - Bei Regelung auf 3 m/s gibt es keine Überschwingung
- Die Einschwingzeit dauert im allgemeinen länger
  - Bei Regelung auf 1 m/s gibt es eine Verkürzung der Einschwingzeit, sobald die Überschwingung unter 10% fällt
- Zu Beginn der Regelung werden weniger Strahlventilatoren ein- und wieder ausgeschaltet

Eine künstliche Verlängerung der Schaltzeit in der Steuerung könnte verwendet werden um die Regelung zu mildern.

### 13.3 Andere Geometrie, andere Strahlventilatoren

Im Folgenden wird die PI-Regelung des Beispieltunnels Gotschna mit der PI-Regelung von 2 anderen Tunneln untersucht.

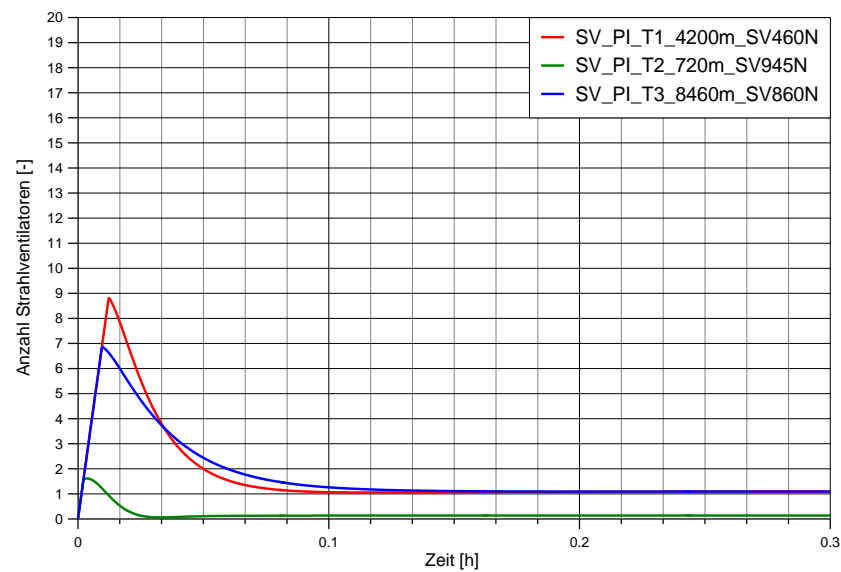
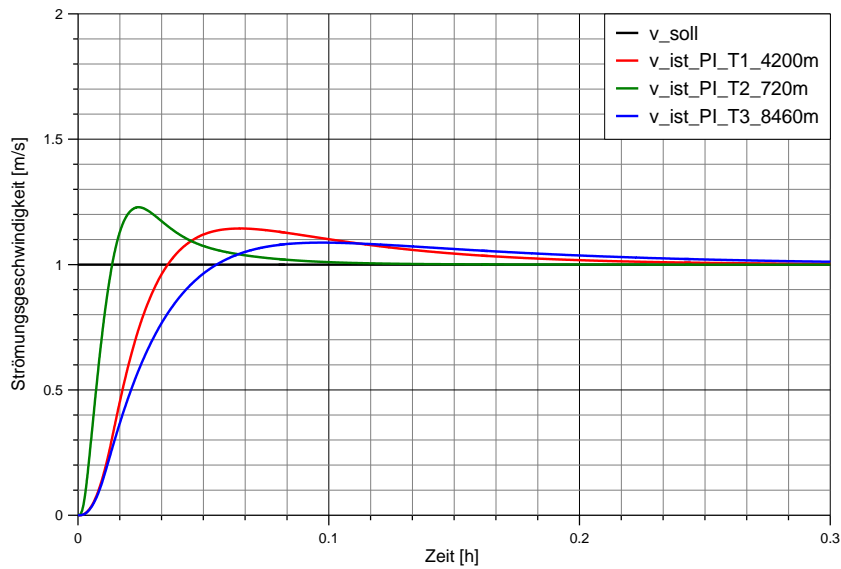
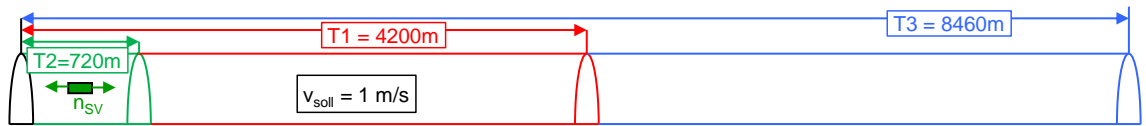
Tab. 13.7 zeigt die Geometrie und die Strahlventilatoraten der untersuchten Tunneln.

	Tunnel 1 (Gotschna)	Tunnel 2	Tunnel 3
<b>Tunneldaten</b>			
Länge Tunnel	4'200 m	720 m	8460 m
Querschnittfläche	46.8 m <sup>2</sup>	48.2 m <sup>2</sup>	47.7 m <sup>2</sup>
Hydraulischer Durchmesser	6.7 m	7.16 m	7.04 m
<b>Strahlventilatoraten</b>			
Anzahl Strahlventilatoren	24	8	60
Lafraddurchmesser	630 mm	800 mm	1000 mm
Querschnittsfläche	0.312 m <sup>2</sup>	0.503 m <sup>2</sup>	0.785 m <sup>2</sup>
Stand Schub	460 N	945 N	860 N
Ausblasgeschwindigkeit für Stand Schub	35.07 m/s	39.59 m/s	30.21 m/s

Tab. 13.7 Geometrie und Strahlventilatoraten der untersuchten Tunneln

### 13.3.1 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler

Abb. 13.5 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols für verschiedene Tunnel.



Abkürzungen:  
 v\_soll: Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 v\_ist: Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 SV: Anzahl Strahlventilatoren  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 T2\_720m: Regelung des Tunnels T2 mit Länge 720m  
 SV945N: Strahlventilatoren mit Standschub von 945 N

Abb. 13.5 Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols für verschiedene Tunnel

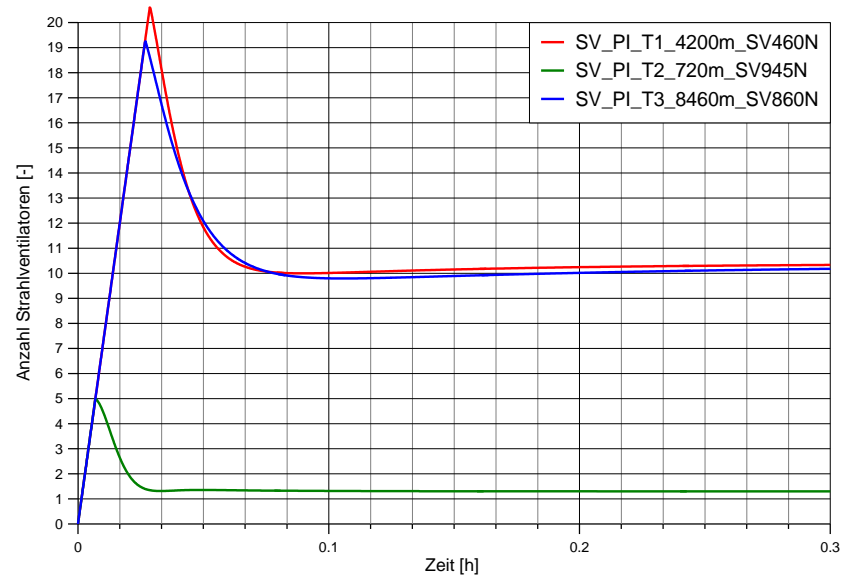
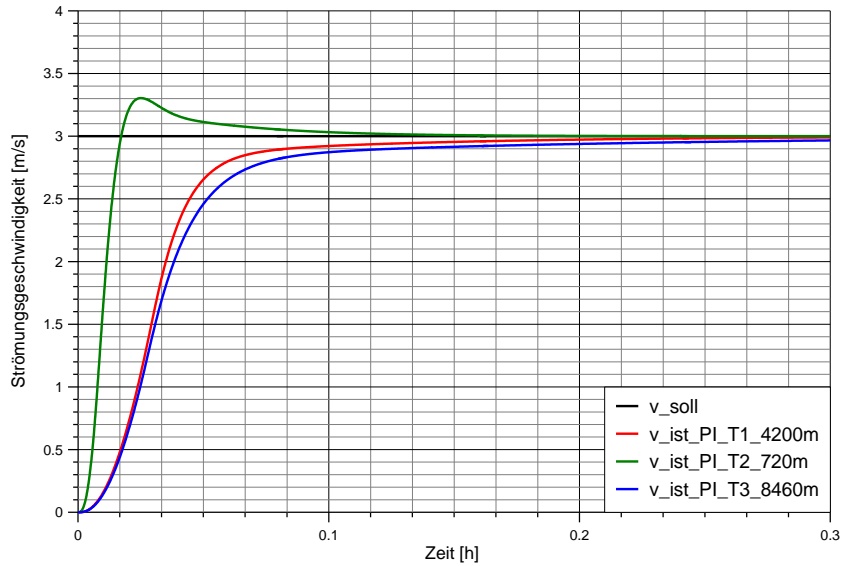
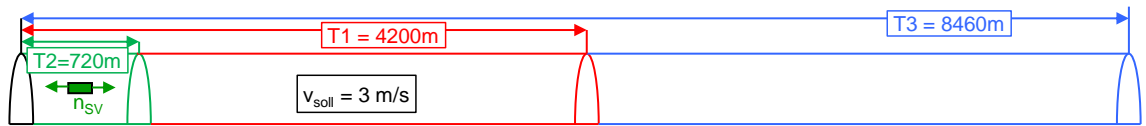
Tab. 13.8 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regelung für verschiedene Tunnel.

Regelung 1 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
Tunnel 1 L=4200m	< 2 min	≈ 0.15 m/s ≈ 15%	≈ 6 min
Tunnel 2 L=720m	< 1 min	≈ 0.2 m/s ≈ 20%	< 3 min
Tunnel 3 L=8460m	< 3 min	≈ 0.1 m/s ≈ 10%	≈ 6 min

Tab. 13.8 *Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regelung für verschiedene Tunnel*

### 13.3.2 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler

Abb. 13.6 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols für verschiedene Tunnel.



Abkürzungen:  
 $v_{soll}$ : Soll-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 $v_{ist}$ : Ist-Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  
 SV: Anzahl Strahlventilatoren  
 PI: Regelung mit PI-Regler  
 T2\_720m: Regelung des Tunnels T2 mit Länge 720m  
 SV945N: Strahlventilatoren mit Standschub von 945 N

Abb. 13.6 Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols für verschiedene Tunnel

Tab. 13.9 zeigt die Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regelung für verschiedene Tunnel.

Regelung 3 m/s	Anstiegszeit $T_{R90\%}$	Überschwingung $\Delta v$	Einschwingzeit $T_{S10\%}$
Tunnel 1 L=4200m	≈ 3 min	≈ 0.3 m/s ≈ 10%	≈ 3 min
Tunnel 2 L=720m	≈ 1 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 1 min
Tunnel 3 L=8460m	≈ 4 min	≈ 0 m/s ≈ 0%	≈ 4 min

Tab. 13.9 Anstiegszeit ab Regelungsbeginn, Überschwingung und Einschwingzeit bei Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regelung für verschiedene Tunnel

### 13.3.3 Zusammenfassung andere Geometrie, andere Strahlventilatoren

Folgende Aussagen lassen sich von den Simulationen ableiten:

- Die PI-Regelung mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols funktioniert gut, sowohl bei kurzen als auch bei langen Tunneln
- Je kürzer der Tunnel, desto schneller ist die Anstiegszeit
- Je kürzer der Tunnel, desto grösser die Überschwingung

## 13.4 Stördrücke

In einem realen Tunnel treten bei einem Unfall mit Brand verschiedenste Stördrücke auf, welche die Regelung ausgleichen soll, z.B.:

- Kamineffekt durch Temperaturunterschiede zwischen Tunnel und Umgebung
- Meteorologische Drücke
  - Druckunterschiede zwischen den Portalen
  - Winddruck auf Portale
- Verkehr
  - Sich bewegende Fahrzeuge in den ersten Minuten nach Brand
  - Nach einigen Minuten stehende Fahrzeuge
- Auftrieb durch Brand ab Brandbeginn

Konstante Stördrücke sind für die Regelung generell unproblematisch. Zeitlich ändernde Stördrücke sind problematischer.

Im Folgenden wird die PI-Regelung des Beispieletunnels Gotschna mit einem schwingenden Stördruck gestört. Der Stördruck wird mit einer Anzahl Strahlventilatoren (Amplitude) mit sinusförmiger Schwingung simuliert.

Es werden die folgenden Amplituden untersucht:

- 1 Strahlventilator (entspricht ungefähr 10 Pa)
- 5 Strahlventilatoren (entspricht ungefähr 50 Pa)

Es werden folgende Schwingungszeiten untersucht:

- 60s
- 120s
- 180s
- 300s

### 13.4.1 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Abb. 13.7 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).

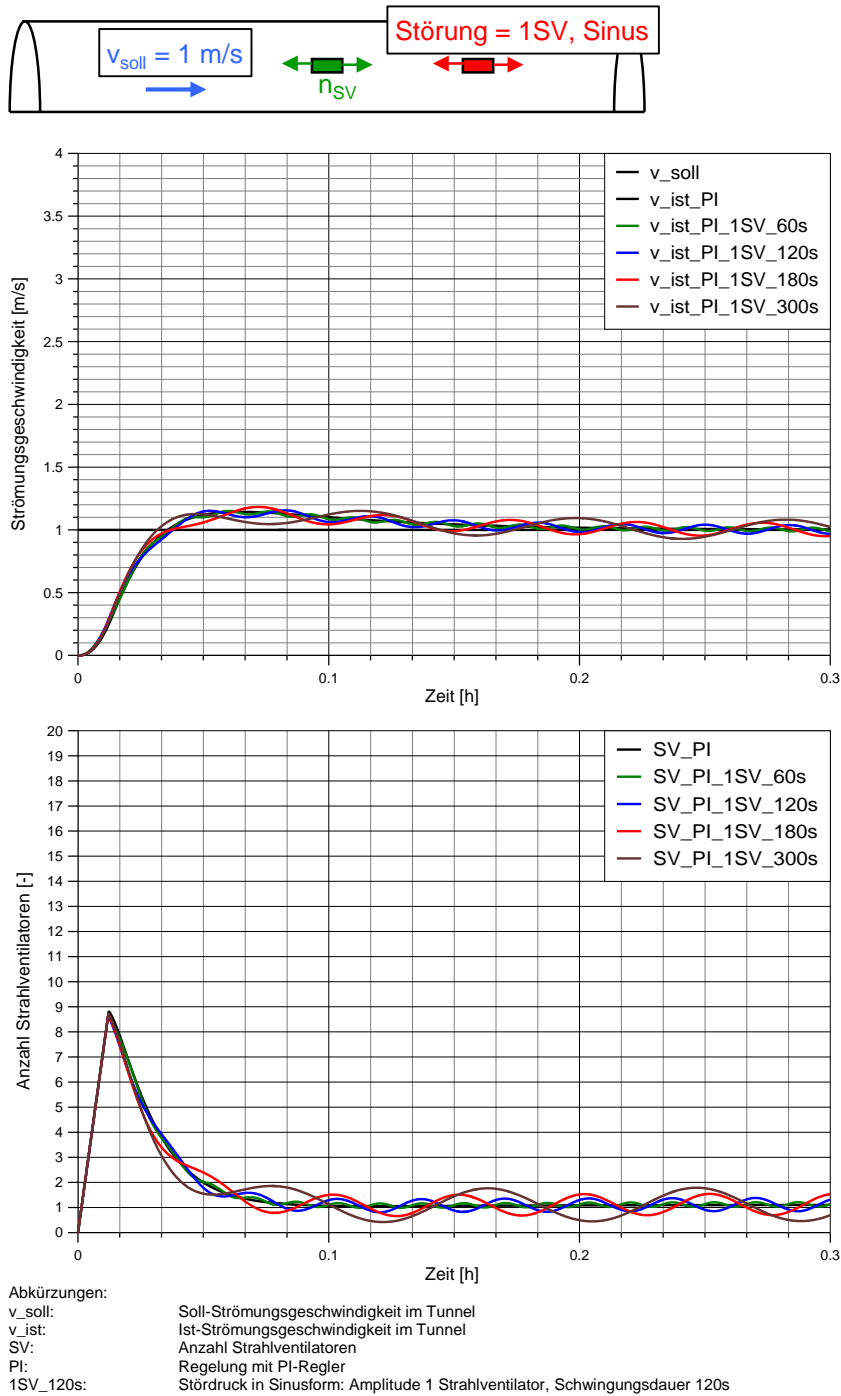


Abb. 13.7 Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Die Regelung gleicht das Störsignal gut aus.

### 13.4.2 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler und Stödrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Abb. 13.8 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stödrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).

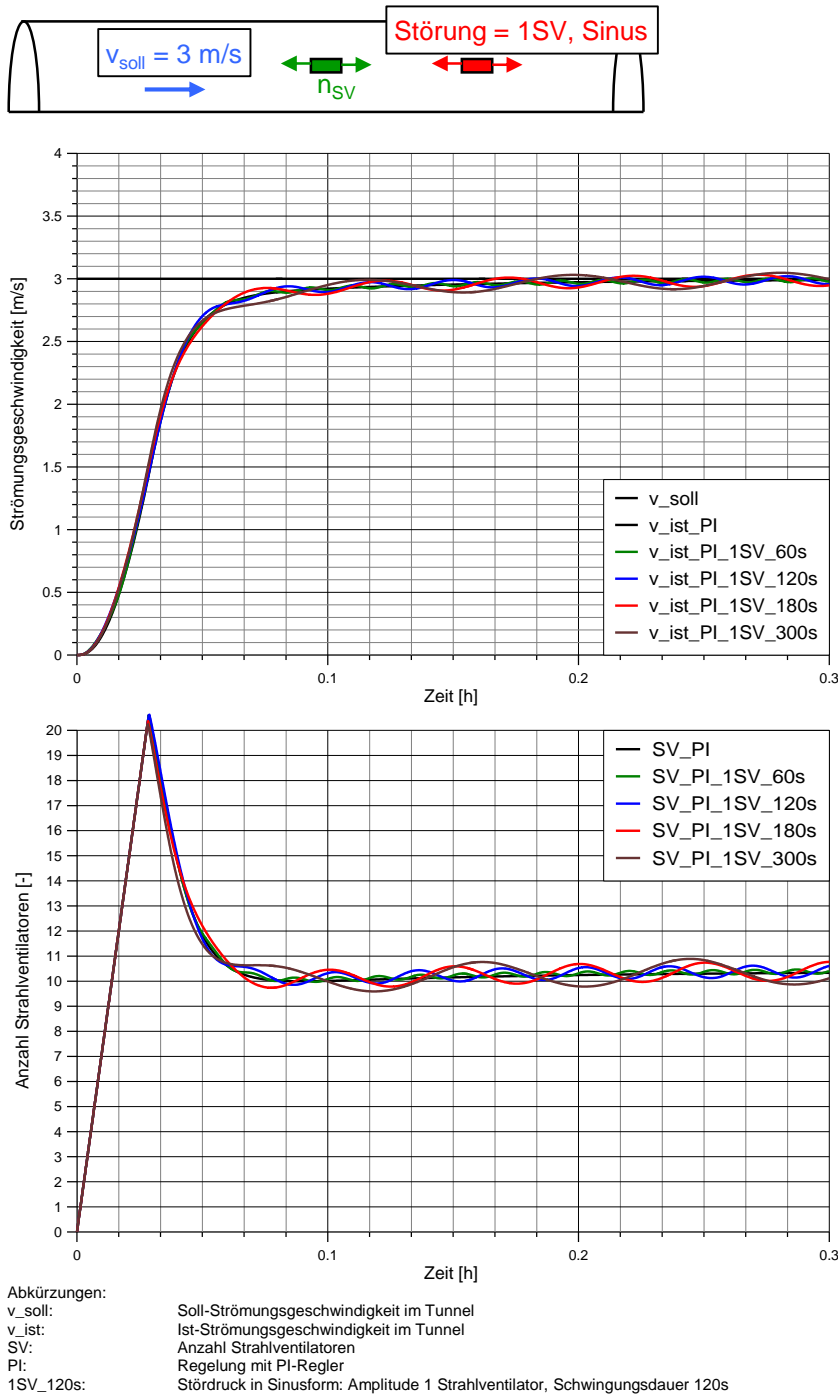


Abb. 13.8 Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stödrücken (1 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Die Regelung gleicht das Störsignal gut aus.

### 13.4.3 Regelung des Systems LL auf 1 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Abb. 13.9 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).

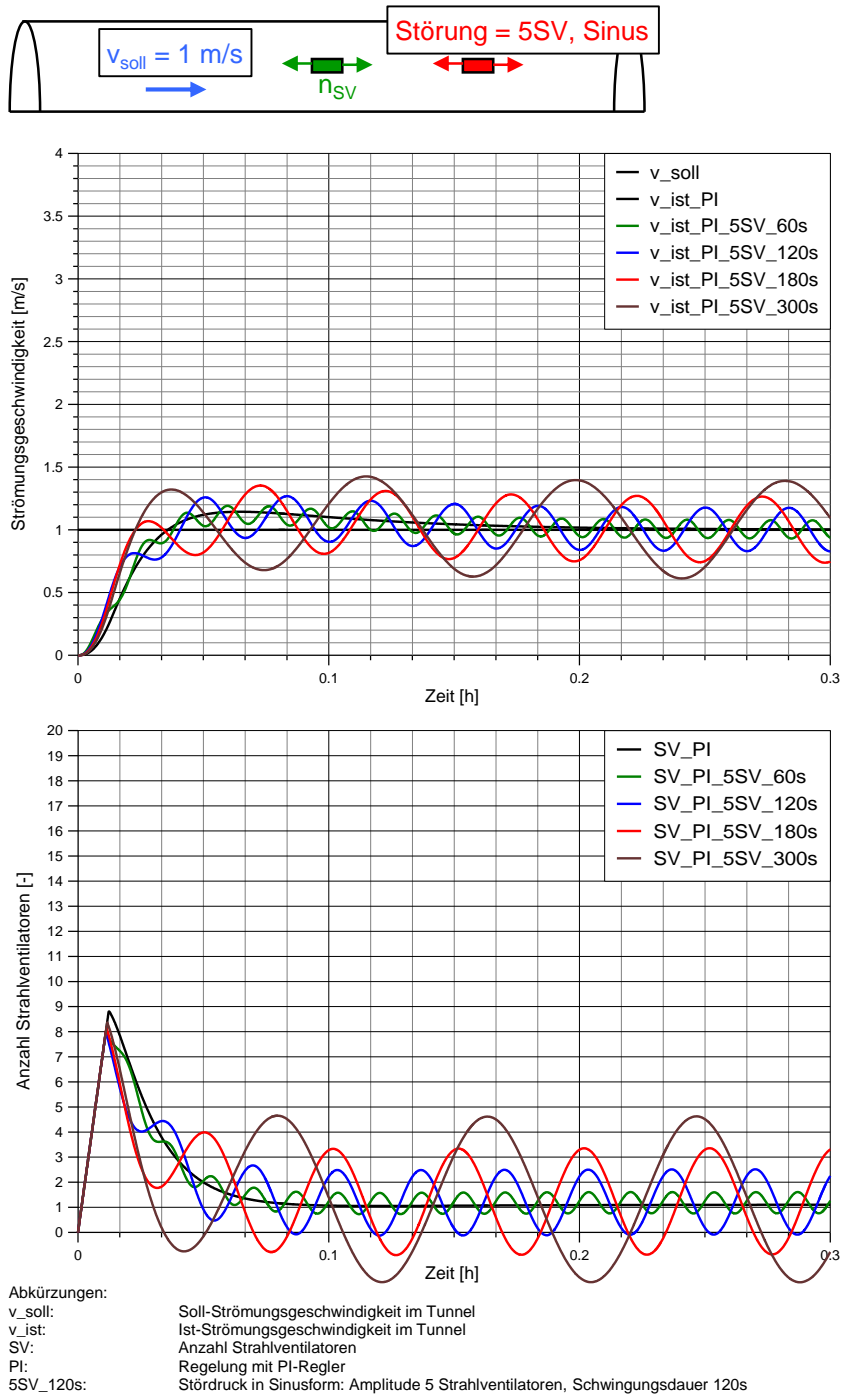


Abb. 13.9 Regelung auf 1 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Bei der Schwingungsdauer von 60s schafft es die Regelung, unter eine periodische Schwingung von  $\pm 10\%$  des Sollwerts zu kommen. Bei grösseren Schwingungszeiten, bleibt die periodische Schwingung grösser als  $\pm 10\%$ .

### 13.4.4 Regelung des Systems LL auf 3 m/s mit PI-Regler und Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Abb. 13.10 zeigt die Simulation der Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten).

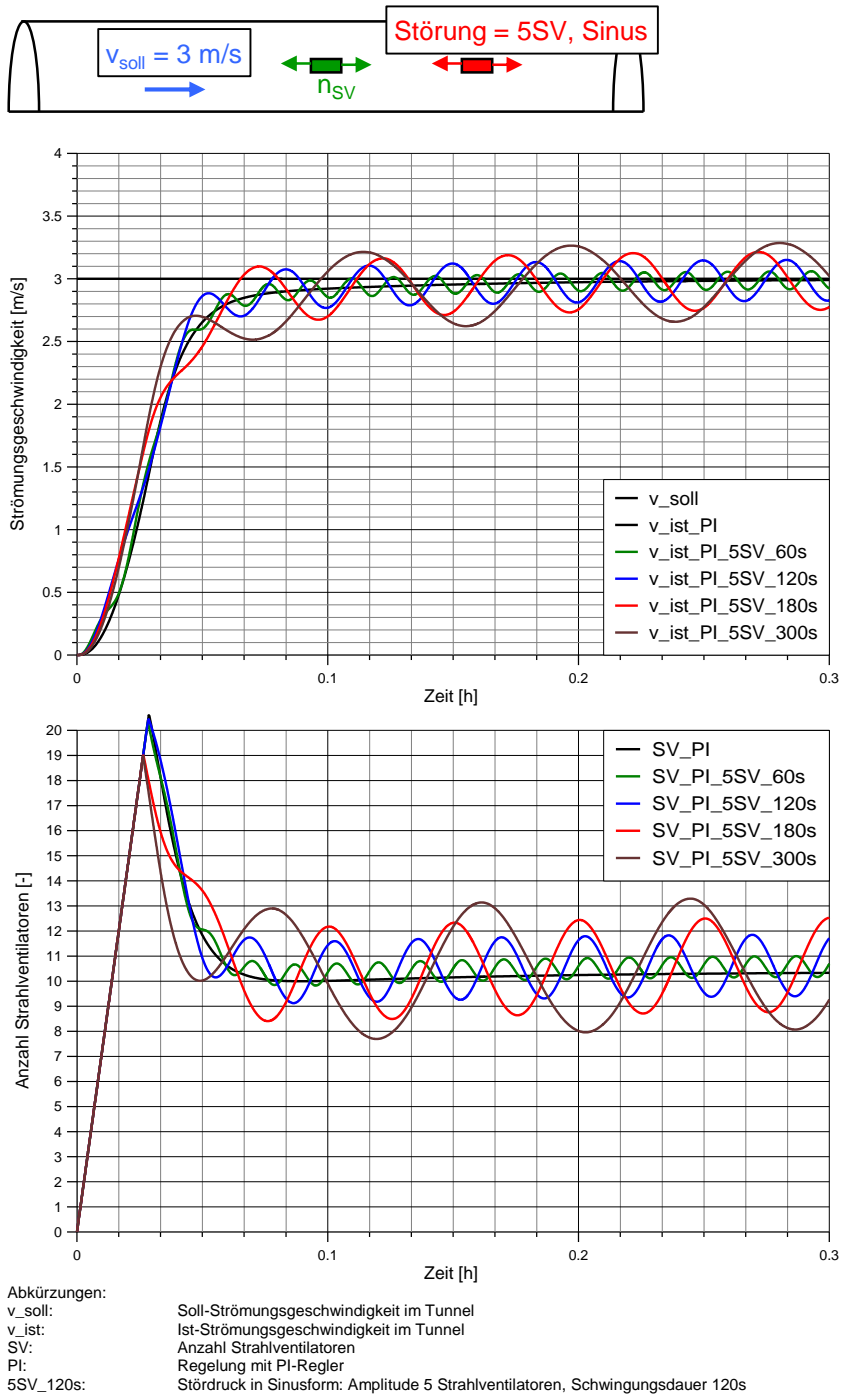


Abb. 13.10 Regelung auf 3 m/s mit PI-Regler mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols mit Stördrücken (5 SV, unterschiedliche Schwingungszeiten)

Bei der Schwingungsdauer von bis zu 180s schafft es die Regelung, unter eine periodische Schwingung von  $\pm 10\%$  des Sollwerts zu kommen.

Bei grösseren Schwingungszeiten, bleibt die periodische Schwingung grösser als  $\pm 10\%$ .

### 13.4.5 Vergleich zwischen PI-, PID-Regler und Schrittweiser Berechnung bei Stördrücken

Abb. 13.11 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-, PID-Regler und Schrittweiser Berechnung mit Stördrücken (5 SV, Schwingungsdauer 180s).

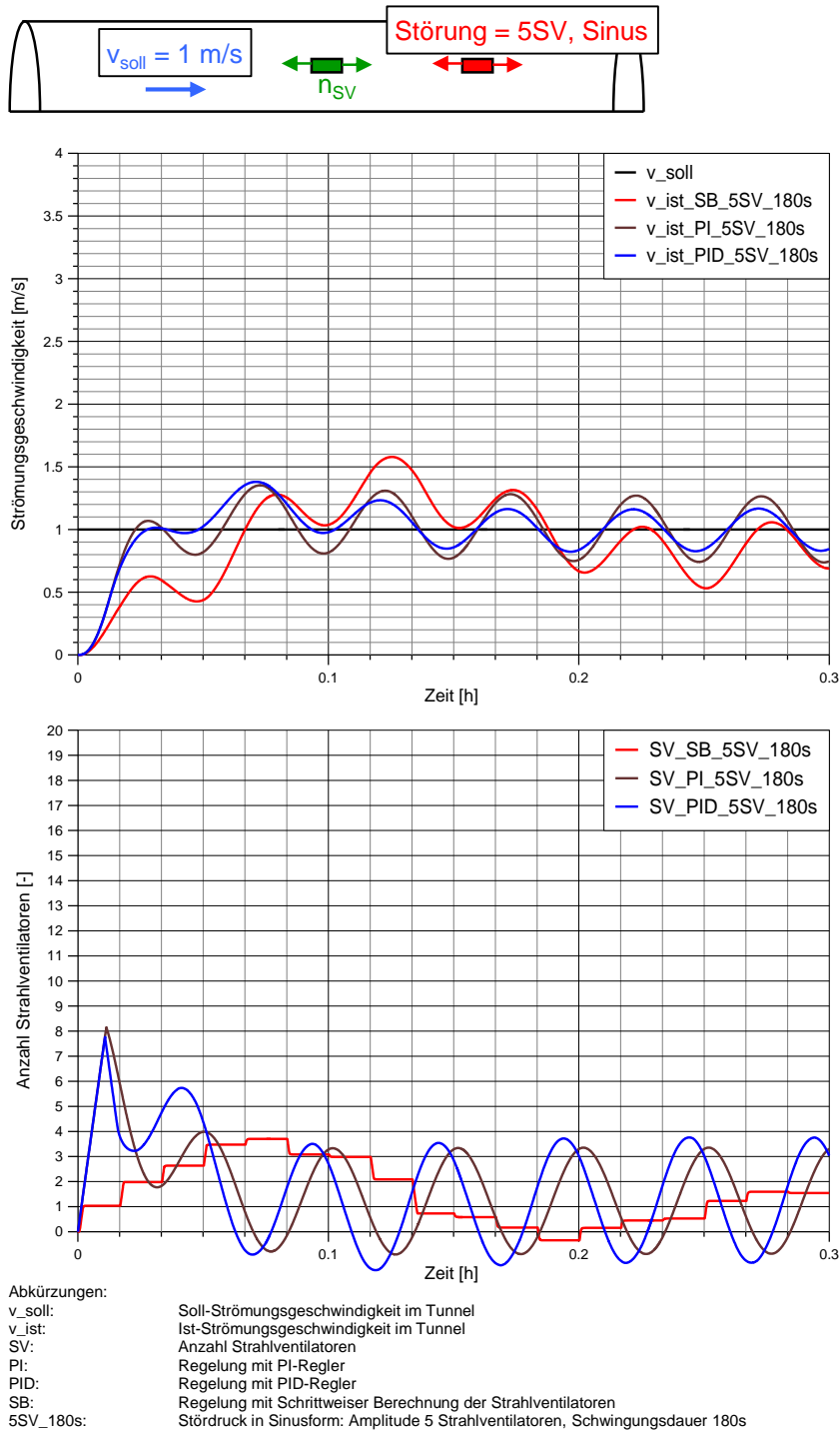


Abb. 13.11 Regelung auf 1 m/s mit PI-, PID-Regler und Schrittweiser Berechnung mit Stördrücken (5 SV, Schwingungsdauer 180s)

Abb. 13.12 zeigt die Simulation der Regelung auf 1 m/s mit PI-, PID-Regler und Schrittweiser Berechnung mit Stördrücken (5 SV, Schwingungsdauer 300s).

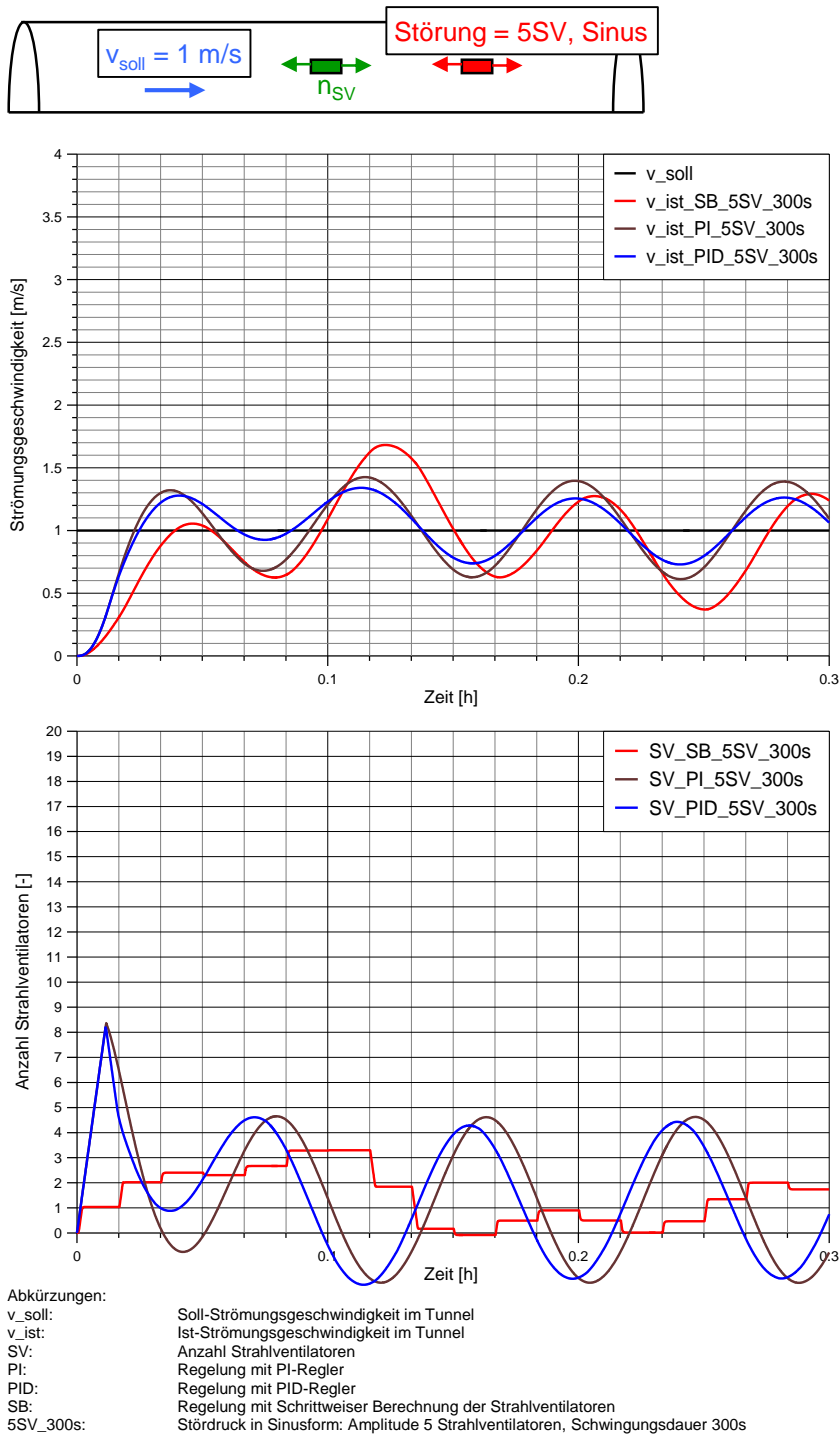


Abb. 13.12 Regelung auf 1 m/s mit PI-, PID-Regler und Schrittweiser Berechnung mit Stördrücken (5 SV, Schwingungsdauer 300s)

### 13.4.6 Zusammenfassung schwingende Stördrücke

Folgende Aussagen lassen sich von den Simulationen ableiten:

- Je grösser die Schwingungsdauer des Stördrucks, desto grösser die Schwingungen der Strömungsgeschwindigkeit
- Je grösser der Sollwert der Strömungsgeschwindigkeit, desto
  - kleiner die absolute Schwingung der Strömungsgeschwindigkeit
  - kleiner die relative Schwingung der Strömungsgeschwindigkeit im Verhältnis zum Sollwert
  - stabiler die Regelung

Vergleich zwischen verschiedenen Reglern und schwingenden Stördrücken:

- Die Schrittweise Berechnung hat 2 überlagerte Schwingungen
  - Kurze Schwingungen durch die Stördrücke
  - Längere Schwingungen um den Sollwert, welche auch ohne Stördrücke auftreten würden
- Die PI- und die PID-Regelung haben nach kurzer Zeit eine bleibende konstante Schwingung um den Sollwert
- Die PID-Regelung hat bei konstant schwingenden Stördrücken eine leicht kleinere Schwingung als die PI-Regelung



# Anhänge

<b>I</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>253</b>
I.1	LZI-System oder LTI-System.....	253
I.2	Robuste Regelung.....	253
I.3	Anstiegszeit, Anregelzeit.....	253
I.4	Totzeit.....	253
I.5	Einschwingzeit, Ausregelzeit.....	254
I.6	Überschwingung, Überschwingweite.....	254
I.7	Bleibende Regelabweichung.....	254
I.8	Tiefpass 1. Ordnung (PT1).....	254
<b>II</b>	<b>Laplace Transformation: Zeit- zu Frequenzbereich</b> .....	<b>257</b>
<b>III</b>	<b>Linearisierung</b> .....	<b>258</b>
III.1	Linearisierung einer Quadratischen Funktion.....	258
III.2	Linearisierung mit Verschiebung der Geraden durch den Nullpunkt.....	261
<b>IV</b>	<b>Nichtlineare Modellierung des Referenz隧nells</b> .....	<b>263</b>
IV.1	Beispiel隧nnel.....	263
IV.2	Vergleich Sprungantwort Messung und Simulation.....	265
IV.3	Validierung der Modelle.....	266
<b>V</b>	<b>Unsicherheiten, Unbekannte und Vereinfachungen</b> .....	<b>270</b>
V.1	Modellierung des Tunnels.....	270
V.2	Modellierung der Strahlventilatoren.....	271

# I Glossar

## I.1 LZI-System oder LTI-System

Als ein lineares zeitinvariantes System „LZI-System“ (engl. linear time-invariant system bzw. „LTI-System“), wird ein System bezeichnet, wenn es sowohl die Eigenschaft der Linearität aufweist als auch unabhängig von zeitlichen Verschiebungen ist.

Die Bedeutung dieser Systeme liegt darin, dass sie besonders einfache Transformationsgleichungen aufweisen und der Systemanalyse damit leicht zugänglich sind. Viele technische Systeme weisen diese Eigenschaften näherungsweise auf. Einige LTI-Systeme lassen sich durch lineare gewöhnliche Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten beschreiben.

## I.2 Robuste Regelung

Ein Regler ist "robust", wenn eine leichte Änderung des Systems nur eine kleine Änderung des Regelverhaltens verursacht. Je grösser die Unsicherheit des modellierten Systems ist, desto grösser sollte die Robustheit des Reglers sein.

Ursachen für das sich ändernde System- bzw. Streckenverhalten sind zum Beispiel:

- Die Regelstrecke ist nicht vollständig bekannt
- Das Entwurfsmodell entstand aus der Vereinfachung eines komplizierteren Modells, insbesondere durch Linearisierung um unterschiedliche Arbeitspunkte
- Die Regelstruktur ändert sich wegen des Ausfalls von Sensoren

## I.3 Anstiegszeit, Anregelzeit

Es gibt verschiedene Definitionen für die Anregelzeit und die Anstiegszeit/Abfallzeit (engl. „rise time“ und „fall time“).

In [27] wird zum Beispiel die Anregelzeit definiert als „Zeitspanne, die beginnt, wenn der Wert der Regelgrösse nach einem Sprung der Führungsgrösse oder einer Störgrösse einen vorgegebenen Toleranzbereich der Regelgrösse verlässt, und die endet, wenn er in diesen Bereich erstmalig wieder eintritt.“

Für den Toleranzbereich wird üblicherweise  $\pm 10\%$  angenommen.

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall interessiert weniger die Zeitdauer ab 10% des Ausgangssignals, sondern die Zeit ab Beginn der Regelung (bzw. Sollwertänderung). Deshalb wird in dieser Arbeit der Begriff „Anstiegszeit ab Regelungsbeginn“ verwendet. Für das Erreichen von 90% des Sollwerts wird die Schreibweise  $T_{R90\%}$  verwendet.

## I.4 Totzeit

Als Totzeit (auch Laufzeit oder Transportzeit genannt) wird die Zeitspanne zwischen Änderung am Systemeingang und Antwort am Systemausgang einer Regelstrecke bezeichnet. Ein System mit Totzeit wird auch als Totzeitglied bezeichnet.

## I.5 Einschwingzeit, Ausregelzeit

Es gibt verschiedene Definitionen für die Einregelzeit und die Einschwingzeit (engl. „settling time“).

In [27] wird die Einregelzeit definiert als „Zeitspanne, die beginnt, wenn der Wert der Regelgrösse nach einem Sprung der Führungsgrösse oder einer Störgrösse einen vorgegebenen Toleranzbereich der Regelgrösse verlässt, und die endet, wenn er in diesen Bereich zum dauernden Verbleib wieder eintritt.“

Für den Toleranzbereich wird üblicherweise  $\pm 10\%$  angenommen.

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall interessiert weniger die Zeitdauer ab 10% des Ausgangssignals, sondern die Zeit ab Beginn der Regelung (bzw. Sollwertänderung). Deshalb wird in dieser Arbeit der Begriff „Einschwingzeit ab Regelungsbeginn“ verwendet. Für das dauerhafte Erreichen von  $\pm 10\%$  des Sollwerts wird die Schreibweise  $T_{S10\%}$  verwendet.

## I.6 Überschwingung, Überschwingweite

Überschwingung (engl. „overshoot“) bedeutet, dass nach einer sprunghaften Änderung einer Eingangsgösse eine Ausgangsgösse den erwünschten Wert nicht direkt erreicht, sondern über den Sollwert hinausschiesst und sich erst danach auf den erwünschten Wert einstellt.

In [27] wird die „Überschwingweite“ definiert als „grösste vorübergehende Sollwertabweichung des Ist-Wertes der Regelgrösse während des Einschwingvorganges“.

Die Überschwingung wird meist in Prozent des Sollwertes angegeben.

## I.7 Bleibende Regelabweichung

Unter bleibender Regelabweichung (eng. „steady-state error“) wird die Differenz zwischen Soll-Wert und Ist-Wert verstanden, wenn das System im stationären Zustand angekommen ist.

## I.8 Tiefpass 1. Ordnung (PT1)

Abb. I.1 zeigt das Signalfussbild eines Tiefpasses 1. Ordnung.

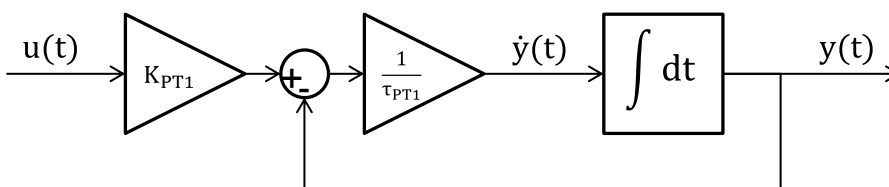


Abb. I.1 Signalfussbild eines Tiefpasses 1. Ordnung

Für einen Tiefpass 1. Ordnung gilt die folgende Differentialgleichung:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{PT1}} \cdot (K_{PT1} \cdot u(t) - y(t)) = \frac{K_{PT1}}{\tau_{PT1}} \cdot u(t) - \frac{1}{\tau_{PT1}} \cdot y(t) \quad I-1$$

Mit:

u	Eingangssignal	
y	Ausgangssignal	
t	Zeit	[s]
$\tau_{PT1}$	Zeitkonstante des Tiefpass 1. Ordnung	[s]

$K_{PT1}$  Verstärkungsfaktor des Tiefpass 1. Ordnung

Im Frequenzbereich ergibt sich:

$$s \cdot y(s) = \frac{K_{PT1}}{\tau_{PT1}} \cdot u(s) - \frac{1}{\tau_{PT1}} \cdot y(s) \quad I-2$$

Mit:

$s$  Komplexe Frequenz [1/s]

Für die Übertragungsfunktion eines Tiefpasses 1. Ordnung gilt somit:

$$G_{PT1}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = K_{PT1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_{PT1}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{PT1}}\right)} = K_{PT1} \cdot \frac{1}{(\tau_{PT1} \cdot s + 1)} \quad I-3$$

Für die Sprungfunktion gilt für das Eingangssignal:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ u_{\text{end}}, & t > 0 \end{cases} \quad I-4$$

Im Frequenzbereich gilt somit:

$$u(s) = u_{\text{end}} \cdot \frac{1}{s} \quad I-5$$

Eingesetzt in die Übertragungsfunktion:

$$G_{PT1}(s) = \frac{y(s)}{\underbrace{u_{\text{end}} \cdot \frac{1}{s}}_{u(s)}} = K_{PT1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_{PT1}}}{\left(s + \frac{1}{\tau_{PT1}}\right)} \quad I-6$$

Umgeformt ergibt sich für die Sprungfunktion im Frequenzbereich:

$$y(s) = u_{\text{end}} \cdot K_{PT1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_{PT1}}}{s \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_{PT1}}\right)} \quad I-7$$

Diese Gleichung kann wieder in den Zeitbereich umgewandelt werden. Für die Sprungantwort eines Tiefpasses 1. Ordnung gilt somit:

$$y(t) = \underbrace{u_{\text{end}} \cdot K_{PT1}}_{y_{\text{end}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PT1}}}\right) \quad I-8$$

Abb. I.2 zeigt die Sprungantwort eines Tiefpasses 1. Ordnung

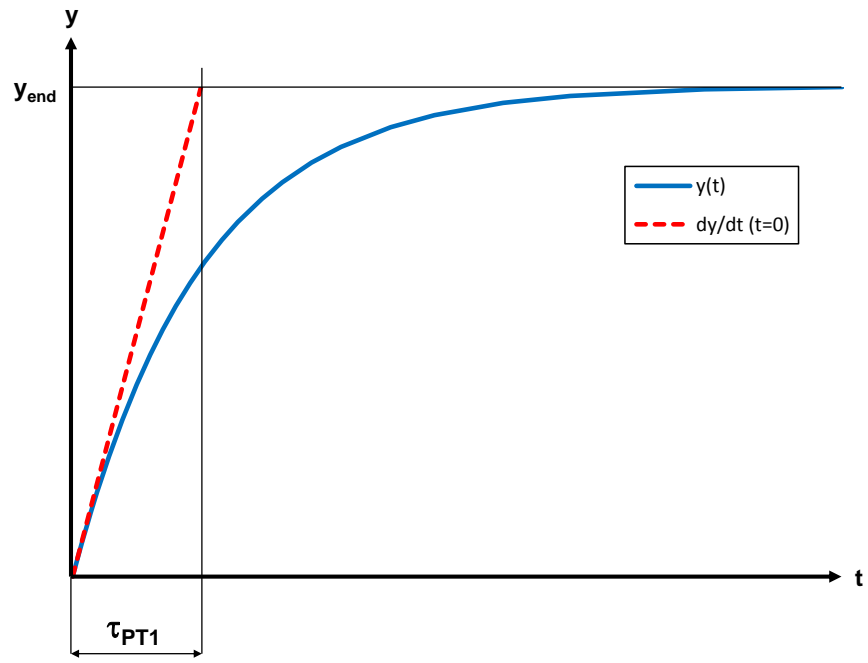


Abb. I.2 Sprungantwort eines Tiefpasses 1. Ordnung

## II Laplace Transformation: Zeit- zu Frequenzbereich

Mit Hilfe der Laplace-Transformation können Differentialgleichungen im Zeitbereich (mit der Variable  $t$ ) in den Frequenzbereich (mit der komplexen Frequenz  $s$ ) umgewandelt werden.

Es gilt:

$$s = \sigma + j\omega \quad \text{II-1}$$

Mit:

$s$	Komplexe Frequenz	[1/s]
$\sigma$	Realteil der komplexen Frequenz	[1/s]
$\omega$	Imaginärteil der komplexen Frequenz	[1/s]

Für  $j$  gilt:

$$j^2 = -1 \quad \text{II-2}$$

Im Frequenzbereich ergibt sich ein multiplikativer Zusammenhang zwischen der Eingangsgrösse  $U(s)$  und der Ausgangsgrösse  $Y(s)$  des Systems. Der Multiplikator  $G(s)$  wird im skalaren Fall Übertragungsfunktion, im Vektorfall Übertragungsmatrix genannt.

Es gilt:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \text{II-3}$$

### III Linearisierung

Die Linearisierung einer Funktion  $y(x)$  in einem Punkt  $x_{Lin}$  ist allgemein wie folgt definiert (z.B. gemäss [28]):

$$y(x) = f(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung}}}{\approx} f(x_{Lin}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0} \cdot (x - x_{Lin}) \quad \text{III-1}$$

Die Linearisierung approximiert die Originalfunktion um den Punkt  $x_{Lin}$ . Dabei ist  $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{Lin}}$  der Anstieg im Punkt  $x_{Lin}$ .

#### III.1 Linearisierung einer Quadratischen Funktion

Folgende quadratische Funktion soll linearisiert werden:

$$y(x) = k \cdot x^2 \quad \text{III-2}$$

Es gilt:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (k \cdot x^2) \right|_{x_{Lin}} = 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \quad \text{III-3}$$

Daraus folgt dann

$$\begin{aligned} y(x) = k \cdot x^2 &\underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung}}}{\approx} f(x_{Lin}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{Lin}} \cdot (x - x_{Lin}) \\ &= k \cdot x_{Lin}^2 + 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot (x - x_{Lin}) = k \cdot x_{Lin}^2 + 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot x - 2 \cdot k \cdot x_{Lin}^2 \\ &= 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot x - k \cdot x_{Lin}^2 = k \cdot (2 \cdot x_{Lin} \cdot x - x_{Lin}^2) \end{aligned} \quad \text{III-4}$$

Somit:

$$y(x) = k \cdot x^2 \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung}}}{\approx} k \cdot (2 \cdot x_{Lin} \cdot x - x_{Lin}^2) \quad \text{III-5}$$

Für  $k=1$  und mit  $x_{Lin} = 5$  oder  $x_{Lin} = -3$  ergibt sich dann beispielsweise:

$$y(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{lin bei } x_{Lin}=5}}{\approx} 10x - 25 \quad \text{III-6}$$

$$y(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{lin bei } x_{Lin}=-3}}{\approx} -6x - 9$$

Abb. III.1 zeigt die Funktion  $y = x^2$  und Linearisierungen bei  $x_{Lin} = 5$  und  $x_{Lin} = -3$ .

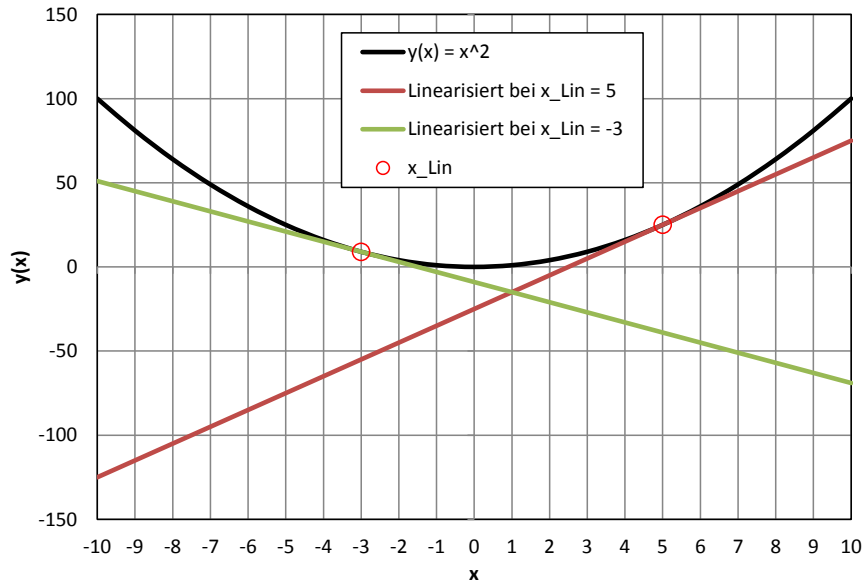


Abb. III.1 Linearisierung von  $y = x^2$  bei  $x_{Lin} = 5$  und  $x_{Lin} = -3$

Für die Funktion  $y = k \cdot (x \cdot |x|)$  (quadratische Funktion inklusive Richtung) gilt folgendes:

$$y = k \cdot x \cdot |x| = \begin{cases} y = k \cdot x^2 & \text{für } x \geq 0 \\ y = -k \cdot x^2 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad \text{III-7}$$

Für  $x_{Lin} > 0$  gilt:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (k \cdot x^2) \right|_{x_{Lin}} = 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \quad \text{III-8}$$

Und somit:

$$y(x) = k \cdot x^2 \underset{\text{Linearisierung}}{\approx} k \cdot (2 \cdot x_{Lin} \cdot x - x_{Lin}^2) \quad \text{III-9}$$

Für  $x_{Lin} < 0$  gilt:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (-x^2) \right|_{x_{Lin}} = -2 \cdot k \cdot x_{Lin} \quad \text{III-10}$$

Daraus folgt dann:

$$\begin{aligned} y(x) = -k \cdot x^2 &\underset{\text{Linearisierung}}{\approx} f(x_{Lin}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{Lin}} \cdot (x - x_{Lin}) \\ &= -k \cdot x_{Lin}^2 - 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot (x - x_{Lin}) \\ &= -k \cdot x_{Lin}^2 - 2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot x + 2 \cdot k \cdot x_{Lin}^2 \\ &= -2 \cdot k \cdot x_{Lin} \cdot x + k \cdot x_{Lin}^2 \\ &= k \cdot (-2 \cdot x_{Lin} \cdot x + x_{Lin}^2) \end{aligned} \quad \text{III-11}$$

Und somit:

$$y(x) = x \cdot |x| \underset{\text{linearisierung}}{\approx} \begin{cases} y = k \cdot (2 \cdot x_{Lin} \cdot x - x_{Lin}^2) & \text{für } x_{Lin} \geq 0 \\ y = k \cdot (-2 \cdot x_{Lin} \cdot x + x_{Lin}^2) & \text{für } x_{Lin} < 0 \end{cases} \quad \text{III-12}$$

Das kann wiederum so formuliert werden:

$$y(x) = x \cdot |x| \underset{\text{Linearisierung}}{\approx} k \cdot (2 \cdot |x_{Lin}| \cdot x - x_{Lin} \cdot |x_{Lin}|) \quad \text{III-13}$$

Für  $k=1$  und mit  $x_{Lin} = 5$  oder  $x_{Lin} = -3$  ergibt sich dann beispielsweise:

$$y(x) \underset{\text{Linearisierung bei } x_{Lin}=5}{\approx} 10x - 25 \quad \text{III-14}$$

$$y(x) \underset{\text{Linearisierung bei } x_{Lin}=-3}{\approx} 6x + 9$$

Abb. III.2 zeigt die Funktion  $y = x \cdot |x|$  und Linearisierungen bei  $x_{Lin}=5$  und  $x_{Lin}=-3$ .

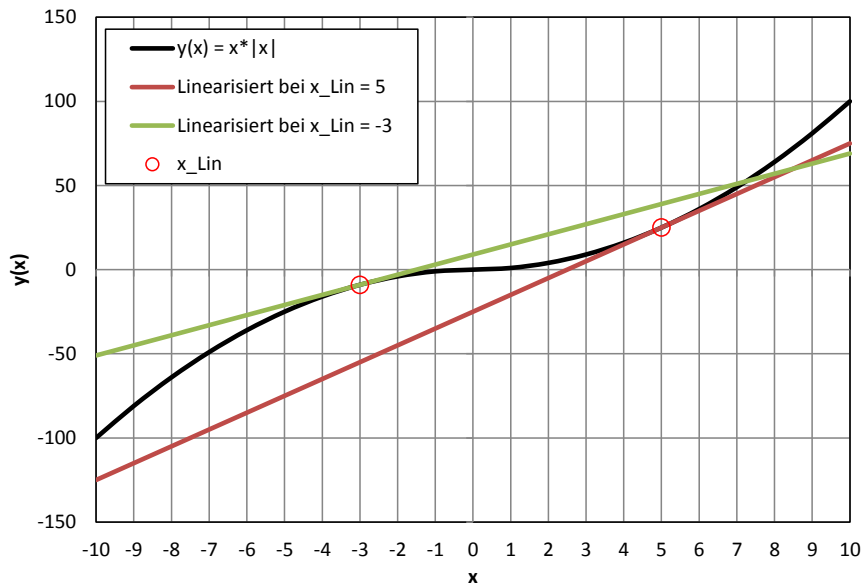


Abb. III.2 Linearisierung von  $y = x \cdot |x|$  bei  $x_{Lin}=5$  und  $x_{Lin}=-3$

### III.2 Linearisierung mit Verschiebung der Geraden durch den Nullpunkt

Bei der Linearisierung ergibt sich ein konstanter Anteil, der für das dynamische Verhalten des Systems nicht relevant ist. Nach einer Verschiebung geht die linearisierte Funktion durch den Nullpunkt (Symmetrie). Somit gilt:

$$y(x) = f(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung} \\ \text{mit Verschiebung der Geraden} \\ \text{durch den Nullpunkt}}}{\approx} \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{\text{Lin}}} \cdot x \quad \text{III-15}$$

Diese Linearisierung übernimmt lediglich die Steigung der Kurve im Punkt  $x_{\text{Lin}}$ , geht jedoch durch den Nullpunkt.

Beispiel:  $y(x) = x \cdot |x|$

Für die Funktion  $y = x^2$  inklusive Richtung gilt folgendes:

$$y = x \cdot |x| = \begin{cases} y = x^2 & \text{für } x \geq 0 \\ y = -x^2 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad \text{III-16}$$

Es gilt:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (x^2) \right|_{x_{\text{Lin}}} = 2 \cdot x_{\text{Lin}} \quad \text{III-17}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (-x^2) \right|_{x_{\text{Lin}}} = -2 \cdot x_{\text{Lin}} \quad \text{III-18}$$

Und somit:

$$y(x) = x \cdot |x| \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung} \\ \text{mit Verschiebung der Geraden} \\ \text{durch den Nullpunkt}}}{\approx} \begin{cases} y = 2 \cdot x_{\text{Lin}} \cdot x & \text{für } x_{\text{Lin}} \geq 0 \\ y = -2 \cdot x_{\text{Lin}} \cdot x & \text{für } x_{\text{Lin}} < 0 \end{cases} \quad \text{III-19}$$

Das kann wiederum so formuliert werden:

$$y(x) = x \cdot |x| \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung} \\ \text{mit Verschiebung der Geraden} \\ \text{durch den Nullpunkt}}}{\approx} 2 \cdot |x_{\text{Lin}}| \cdot x \quad \text{III-20}$$

Für  $x_{\text{Lin}} = 5$  oder  $x_{\text{Lin}} = -3$  ergibt sich dann beispielsweise:

$$y(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung bei } x_{\text{Lin}}=5 \\ \text{mit Verschiebung der Geraden} \\ \text{durch den Nullpunkt}}}{\approx} 10x \quad \text{III-21}$$

$$y(x) \underset{\substack{\approx \\ \text{Linearisierung bei } x_{\text{Lin}}=-3 \\ \text{mit Verschiebung der Geraden} \\ \text{durch den Nullpunkt}}}{\approx} 6x$$

Abb. III.3 zeigt die Funktion  $y = x \cdot |x|$  und Linearisierungen mit den Steigungen bei  $x_{\text{Lin}}=5$  und  $x_{\text{Lin}}=-3$ .

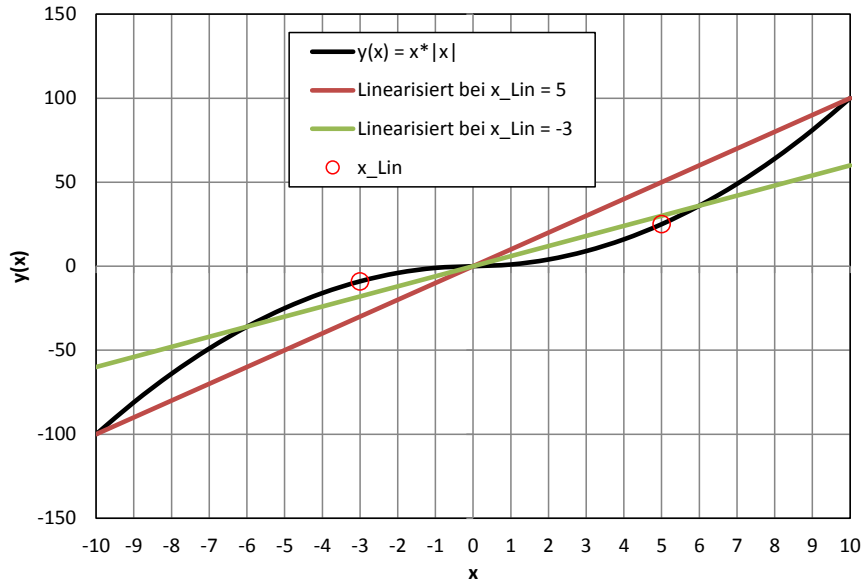


Abb. III.3 Linearisierung bei  $x_{Lin}=5$  und  $x_{Lin}=-3$  mit Verschiebung der Geraden durch den Nullpunkt

## IV Nichtlineare Modellierung des Referenz隧nells

### IV.1 Beispieltunnel

Als Beispieltunnel wird der Gotschnatunnel verwendet, da dieser mit einer Längslüftung mit Strahlventilatoren sowie einer Absaugung über Klappen ausgestattet ist.

Die geometrischen Randbedingungen des Gotschnatunnells sind wie folgt:

Länge Tunnel	4'207 m	
Steigung von Nord nach Süd	auf 208 m	+ 4.00 %
	auf 3'785 m	+ 4.78 %
	auf 214 m	+ 2.11 %
Mittlere Höhe über Meer	1'155 m ü. M.	
Verkehrsraum (Mittelwert):		
Querschnittfläche	46.8 m <sup>2</sup>	
Hydraulischer Durchmesser	6.7 m	
Abluftkanal:		
Länge	4'050 m	
Querschnittfläche	6.68 m <sup>2</sup>	
Hydraulischer Durchmesser	2.24 m	
Zuluftkanäle:		
Gesamtlänge	4'050 m	
Querschnittfläche	4.24 m <sup>2</sup>	
Hydraulischer Durchmesser	1.83 m	

Tab. IV.1 Geometrie des Gotschnatunnells

Die Ausrüstung im Tunnel ist wie folgt:

	Abluft
Fabrikat Ventilator	Howden
Typ Ventilator	170WN+4EME
Laufraddurchmesser	1700 mm
Nabendurchmesser	900 mm
Anzahl Laufschaufeln	6
Masse Ventilator gesamt	6'150 kg
Fabrikat Motor	Loher
Nennspannung Motor	3 x 690 V
Nennleistung Motor	185 kW

Tab. IV.2 Ausrüstung des Gotschnatunnells – Axialventilatoren

Fabrikat	Howden	
Typ	APA - 630 / 280	
Lafraddurchmesser	630 mm	
Nennspannung Motor	3 x 400 V	
Nennleistung Motor	22 kW	
Nennzahl	2935 1/Min.	
Garantierte Leistungsdaten	Standard	mit Schubumlenkung
Stand Schub A → B	645 N	629 N
Stand Schub B → A	275 N	275 N
Schub im Tunnel *	10'200 N	11'400 N
Strömungsgeschwindigkeit *	5.9 m/s	6.2 m/s
* mit 24 Strahlventilatoren im leeren Tunnel ohne Absaugung, ohne Gegendruck		

Tab. IV.3 Ausrüstung des Gotschnatunnels – Strahlventilatoren

## IV.2 Vergleich Sprungantwort Messung und Simulation

Im Gotschnatunnel wurde vor der Eröffnung ein Sprungantwortversuch durchgeführt.

Abb. IV.1 zeigt die Strömungsmessungen des Versuches im realen Tunnel. Es scheint jedoch, dass die Zeitmessungen der SV und der Stömungsgeschwindigkeiten nicht besonders gut aufeinander abgestimmt sind. Die Strömungsgeschwindigkeit ändert sich, bevor die Strahlventilatoren eingeschaltet werden.

Die Totzeit des Tunnels kann mit diesen Messwerten nicht ermittelt werden.

Als Vergleich werden in Abb. IV.1 die Strömungsmessungen zweier Simulation gezeigt. Bei der ersten Simulation ist die Einschalttrate der SV auf 12 SV/min limitiert (rot). Bei der zweiten Simulation auf 24 SV/min (grün).

Die Geschwindigkeit im realen Tunnel sinkt und steigt schneller als in der Simulation. Womöglich ist der Reibungskoeffizient des Modells zu gross gewählt.

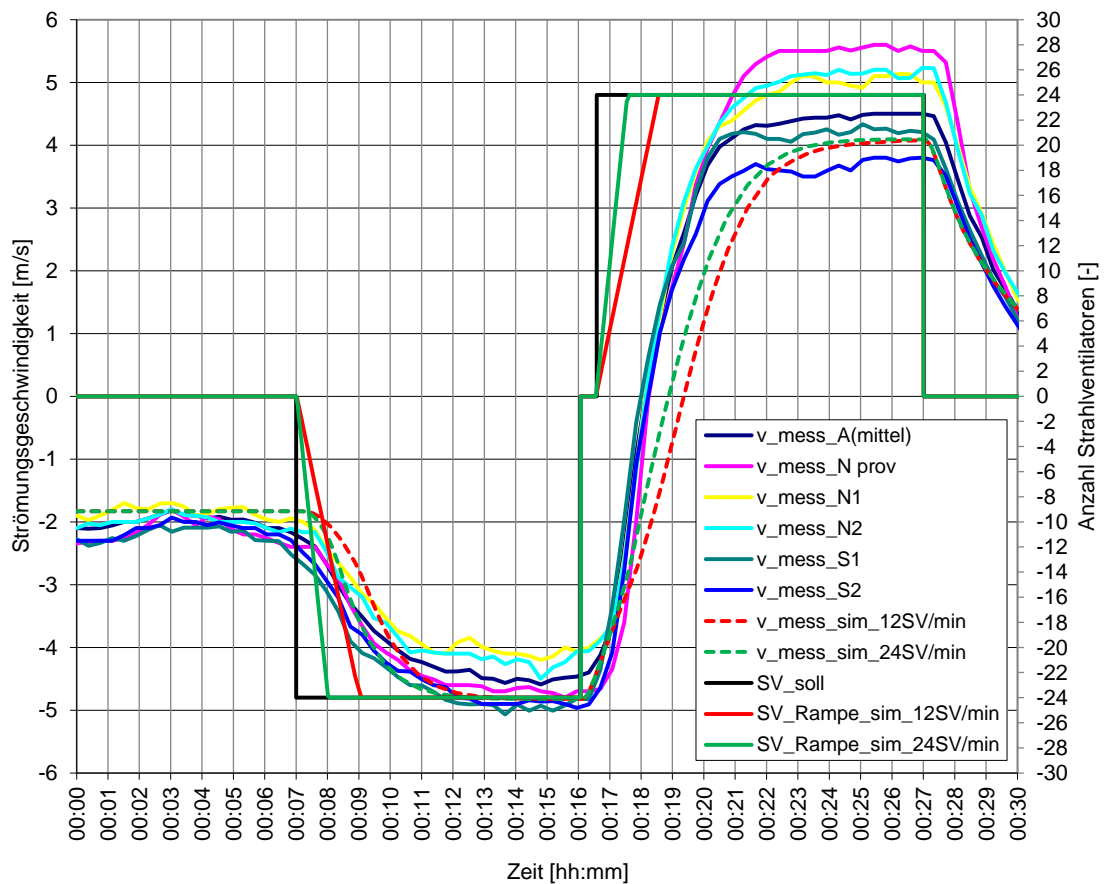


Abb. IV.1 Vergleich zwischen Versuch im realen Tunnel und Simulation einer Sprungantwort

### IV.3 Validierung der Modelle

Das nichtlineare Modell des Beispieletunnels wird sowohl mit der Software „RTV“ [23] als auch mit „MATLAB“ [24] modelliert.

Um die Modelle zu überprüfen, werden einige Szenarien simuliert und die Resultate miteinander verglichen.

Abb. IV.2 zeigt die Simulation der PI-Regelung auf 1.5 m/s mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe in RTV (rot) und MATLAB (grün).

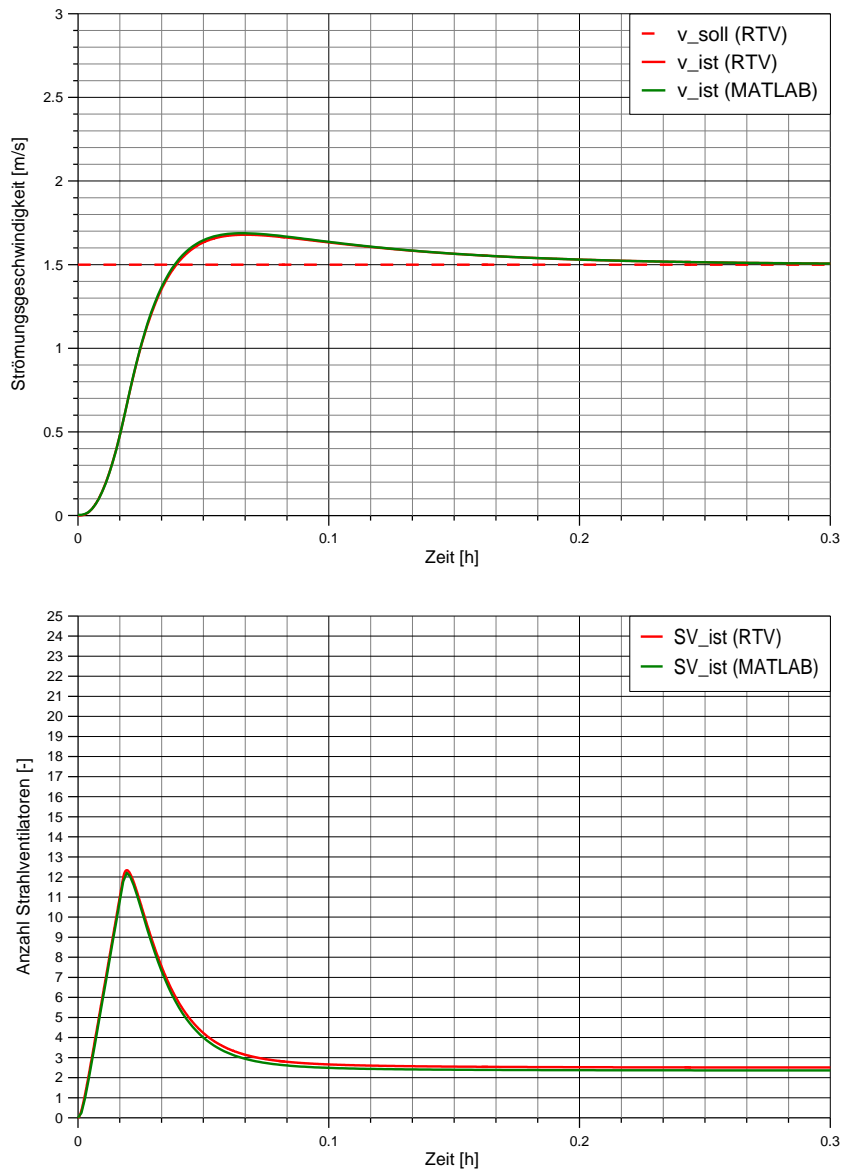


Abb. IV.2 PI-Regelung auf 1.5 m/s mit Anti-Windup in RTV (rot) und MATLAB (grün)  
Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und  
der SV-Einschaltrampe  
(mit  $T_{SV\_TZ} = 5$  s,  $T_{mess\_TZ} = 10$  s,  $T_{R\_TZ\_max} = 50$  s)

Abb. IV.3 zeigt die Simulation der PID-Regelung auf 1.5 m/s mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe in RTV (rot) und MATLAB (grün).

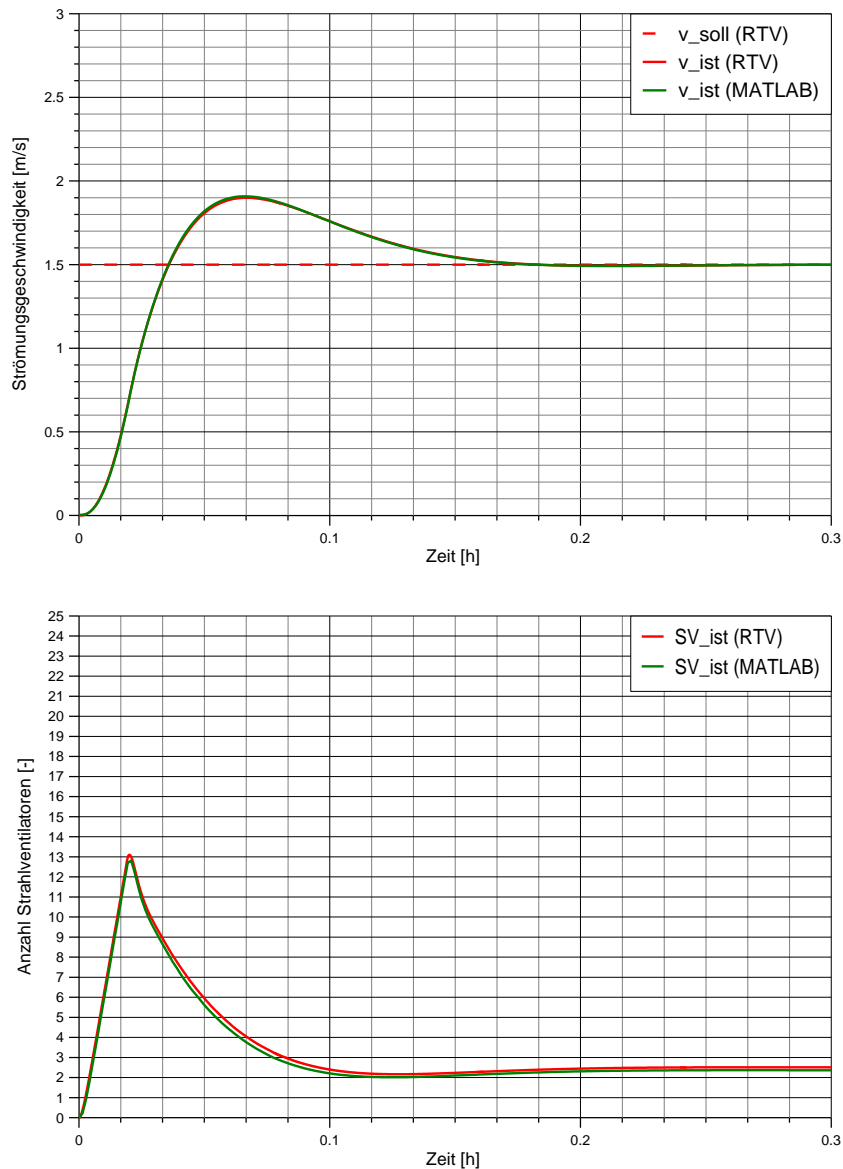


Abb. IV.3 PID-Regelung auf 1.5 m/s mit Anti-Windup in RTV (rot) und MATLAB (grün)  
Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und  
der SV-Einschaltrampe  
(mit  $T_{SV\_TZ} = 5$  s,  $T_{mess\_TZ} = 10$  s,  $T_{R\_TZ\_max} = 50$  s)

Abb. IV.4 zeigt die Simulation der PI-Regelung auf 3 m/s mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe in RTV (rot) und MATLAB (grün).

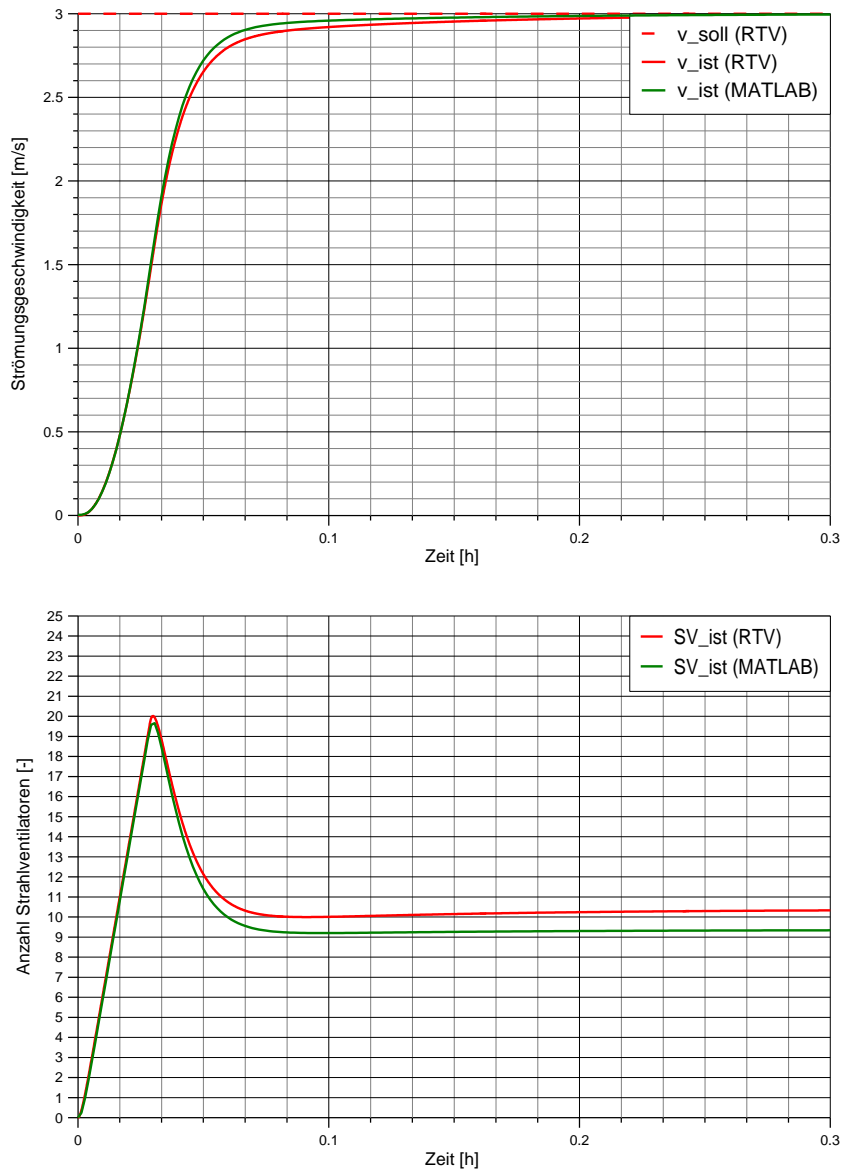


Abb. IV.4 PI-Regelung auf 3 m/s mit Anti-Windup in RTV (rot) und MATLAB (grün) Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe (mit  $T_{SV\_TZ} = 5$  s,  $T_{mess\_TZ} = 10$  s,  $T_{R\_TZ\_max} = 50$  s)

Abb. IV.5 zeigt die Simulation der PID-Regelung auf 3 m/s mit den Einstellungen nach Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und der SV-Einschaltrampe in RTV (rot) und MATLAB (grün).

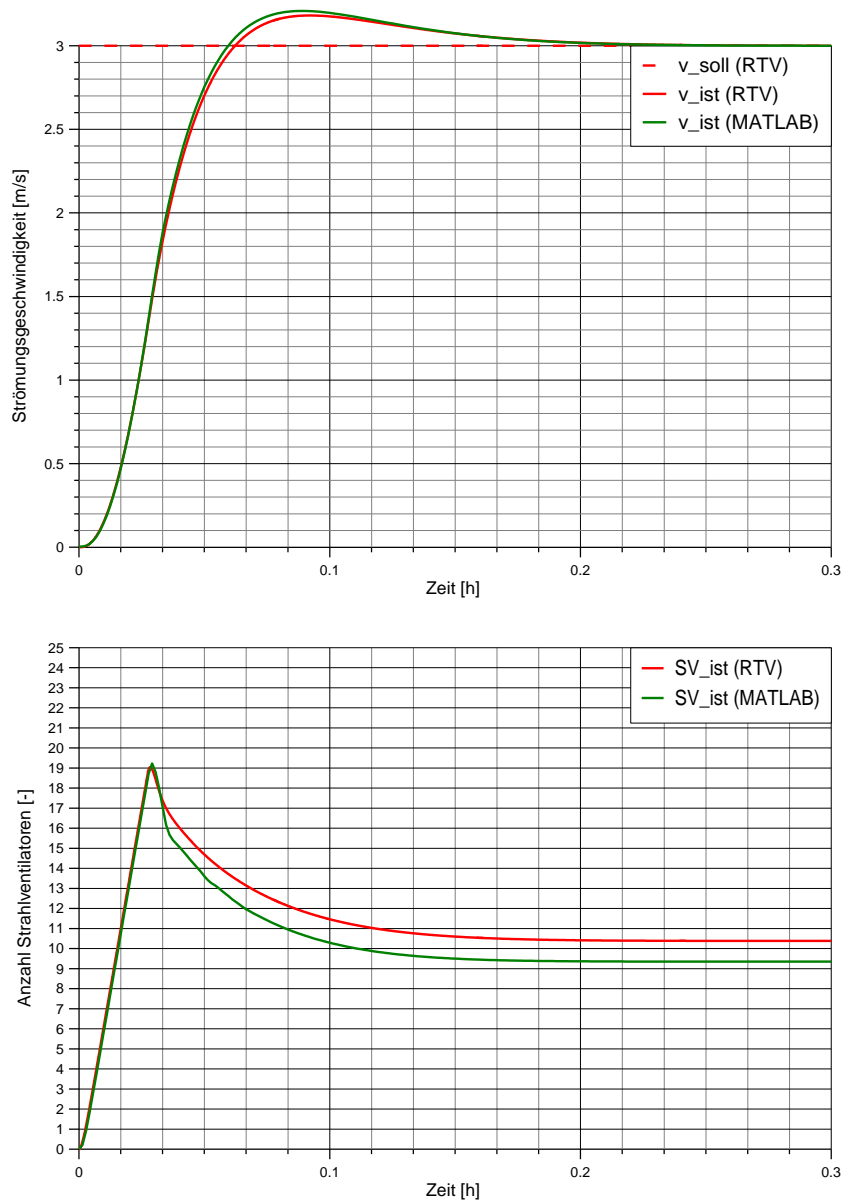


Abb. IV.5 PID-Regelung auf 3 m/s mit Anti-Windup in RTV (rot) und MATLAB (grün)  
Einstellungen gemäss Ziegler/Nichols unter Einbezug der Messfilterung und  
der SV-Einschaltrampe  
(mit  $T_{SV\_TZ} = 5$  s,  $T_{mess\_TZ} = 10$  s,  $T_{R\_TZ\_max} = 50$  s)

## V Unsicherheiten, Unbekannte und Vereinfachungen

### V.1 Modellierung des Tunnels

Einige Parameter der Modellierung aus Kapitel 2 können Unsicherheiten aufweisen oder sind unbekannt.

Die Dichte  $\rho$  ist zeitabhängig und variiert mit Ort und Temperatur. Als Vereinfachung kann eine konstante Dichte angenommen werden.

Der Reibungsbeiwert  $\lambda$  variiert u.a. mit der Strömungsgeschwindigkeit. Die Abweichung im Regelungsbereich ist jedoch gering und kann auch als konstant angenommen werden (siehe Abb. V.1).

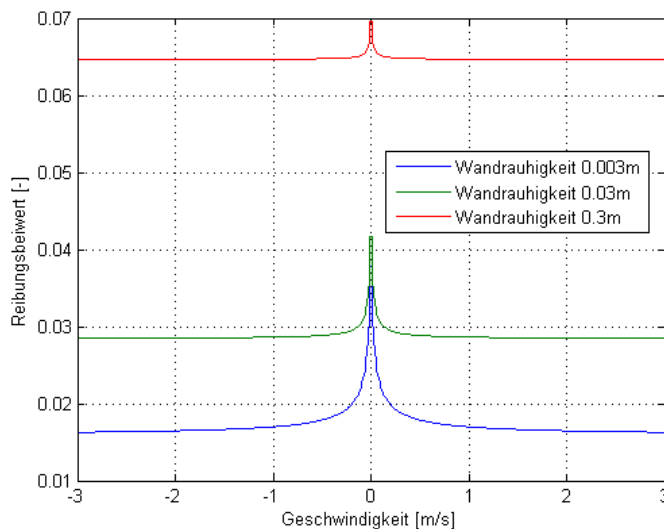


Abb. V.1 Reibungsbeiwert in Abhängigkeit von Wandrauigkeit & Strömungsgeschwindigkeit

Der Reibungsbeiwert  $\lambda$  kann durch Strömungsversuche im Tunnel bestimmt werden.

Der Druckverlust durch Fahrzeuge kann nur genau modelliert werden falls die Anzahl Fahrzeuge sowie der Widerstandsbeiwert ( $c_{w_{Fz}} \cdot A_{Fz}$ ) bekannt sind. Dieser Druckverlust kann durch eine Störgrösse modelliert werden.

Der Kamineffekt wird beim Aufbau des Modells für die Regelung ignoriert.

## V.2 Modellierung der Strahlventilatoren

Die Druckerzeugung  $\Delta p_{SV}$  durch die Strahlventilatoren im Tunnel wurde in Kapitel 2 definiert:

$$\Delta p_{SV} = \frac{\Delta F_{SV}}{A_T} = \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot (v_{SV} - v) \cdot v_{SV}}{k_{SV} \cdot A_T} \quad V-1$$

Mit:

$\Delta p_{SV}$	Druckerzeugung von $n_{SV}$ Strahlventilatoren	[Pa]
$\Delta F_{SV}$	Der Schub von $n_{SV}$ Strahlventilatoren	[N]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ]
$n_{SV\_ist}$	Anzahl laufende Strahlventilatoren	[-]
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche des Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$v_{SV}$	Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators	[m/s]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]

Die Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren  $v_{SV}$  ist in der Regel viel grösser als die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Tunnel:

$$v_{SV} \gg v \quad V-2$$

Somit kann folgendes angenommen werden:

$$v_{SV} - v \approx v_{SV} \quad V-3$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta p_{SV0} = \frac{\Delta F_{SV0}}{A_T} \approx \frac{n_{SV\_ist} \cdot \rho \cdot A_{SV} \cdot v_{SV}^2}{k_{SV} \cdot A_T} \quad V-4$$

Für den prozentualen Fehler des Strahlventilatorschubes  $e_{SV}$  gilt:

$$e_{SV} = \frac{\Delta p_{SV0} - \Delta p_{SV}}{\Delta p_{SV0}} = \frac{\left(\frac{n_{SV\_ist} \rho A_{SV} v_{SV}^2}{k_{SV} A_T}\right) - \left(\frac{n_{SV\_ist} \rho A_{SV} (v_{SV} - v) v_{SV}}{k_{SV} A_T}\right)}{\left(\frac{n_{SV\_ist} \rho A_{SV} v_{SV}^2}{k_{SV} A_T}\right)} = \frac{v}{v_{SV}} \quad V-5$$

Im Nutzungsbereich der Strahlventilatoren (Strömungsgeschwindigkeiten zwischen -3 und +3 m/s) liegt der Fehler dieser Näherung bei weniger als  $\pm 10\%$  (siehe Abb. V.2).

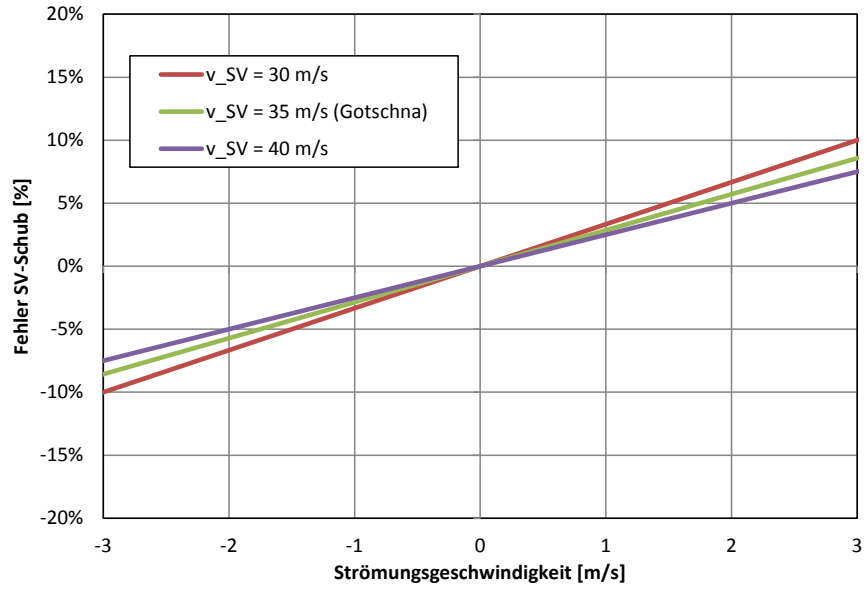


Abb. V.2 Fehler der vereinfachten Schubwirkung der SV in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit  $v$

## Abkürzungen, Variablen, Indizes

### Abkürzungen:

Begriff	Bedeutung
ABS	Absaugung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DGL	Differentialgleichung
HBI	HBI Haerter AG
LL	Längslüftung
LTI	Linear Time-invariant System
LS	Linearisiertes System
LZI	Lineares zeitinvariantes System
MPC	Model Predictive Control
NLM	Nicht-lineares Modell
NLS	Nicht-lineares System
PI	Proportional, Integral
PID	Proportional, Integral, Derivativ
PLC	Programmable Logic Controller (Deutsch: Speicherprogrammierbare Steuerung, SPS)
PT1	Tiefpass 1. Ordnung
PT1TZ	Tiefpass 1. Ordnung mit Totzeit
PT2	Tiefpass 2. Ordnung
PT3	Tiefpass 3. Ordnung
SB	Schrittweise Berechnung der Anzahl Strahlventilatoren
SISO	Single Input Single Output
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (Englisch: Programmable Logic Controller, PLC)
SV	Strahlventilator
TZ	Totzeit
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
WP	Wendepunkt

Tabelle 2 Abkürzungen

### Variablen:

Variable	Beschreibung	Dimension
$a_{LW}$	Lastwagen-Anteil	[%]
$a_{Fz}$	Füllungsgrad des Tunnels mit Fahrzeugen	[%]
$a_T$	Widerstandskonstante des Tunnels	[1/m]
$A_T$	Querschnittsfläche Tunnel	[m <sup>2</sup> ]
$A_{SV}$	Querschnittsfläche eines Strahlventilators	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Fz}$	Querschnittsfläche der Fahrzeuge	[m <sup>2</sup> ]
$A_{LW}$	Querschnittsfläche der Lastwagen	[m <sup>2</sup> ]
$A_{PW}$	Querschnittsfläche der Personenwagen	[m <sup>2</sup> ]
$act_{SV}$	Aktivierungsgrad eines Strahlventilators	[-]
$b_T$	Wirkungskonstante eines SV im Tunnel	[m/s <sup>2</sup> ]
$cw_{Fz}$	Widerstandskoeffizient der Fahrzeuge	[-]
$cw_{LW}$	Widerstandskoeffizient der Lastwagen	[-]

Variable	Beschreibung	Dimension
$c_{PW}$	Widerstandskoeffizient der Personenwagen	[-]
$d_{Fz}$	Dichte der Fahrzeuge pro Fahrspur	[1/m]
$d_{PWE\_max}$	Maximale Personenwageneinheitsdichte pro Spur	[1/m]
$e$	Fehler (z.B. Strömungsgeschwindigkeit)	
$D_{hyd}$	Hydraulischer Durchmesser des Tunnels	[m]
$\Delta F_{1SV\_stand}$	Stand Schub eines Strahlventilators	[N]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$G(s)$	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich	
$k_{SV}$	Einbaufaktor des Strahlventilators	[-]
$k$	Zeitschritt	[-]
$K$	Verstärkungsfaktor	
$K_{PL}$	Ein-/ Ausströmverlustkoeffizient Portal Links	[-]
$K_{PR}$	Ein-/ Ausströmverlustkoeffizient Portal Rechts	[-]
$L$	Länge	[m]
$L_L$	Länge des Abschnitts links von der Absaugung	[m]
$L_R$	Länge des Abschnitts rechts von der Absaugung	[m]
$\lambda$	Reibungskoeffizient des Tunnels	[-]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
$m$	Steigungsrate	
$n_{Fz}$	Anzahl Fahrzeuge im Tunnel	[-]
$n_{PWE\_max}$	Maximale Anzahl Personenwageneinheiten im Tunnel	[-]
$n_{Spur}$	Anzahl Fahrspuren	[-]
$n_{SV}$	Anzahl Strahlventilatoren	[-]
$n_{SV\_ist}$	Anzahl Strahlventilatoren aktiv	[-]
$n_{SV\_soll}$	Anzahl Strahlventilatoren soll (Eingangsgrosse)	[-]
$n_p$	Prädiktionshorizont (prediction horizon)	[-]
$n_c$	Steuerhorizont (control horizon)	[-]
$n_m$	Modellhorizont (model horizon)	[-]
$p$	Druck	[Pa]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[Pa]
$PWE_{LW}$	Personenwageneinheiten der Lastwagen	[-]
$PWE_{PW}$	Personenwageneinheiten der Personenwagen	[-]
$Q$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
$Q$	Gewichtungsmatrix (Gewichtung Regelabweichung)	
$R$	Gewichtungsmatrix (Gewichtung Stellaktivität)	
$\rho$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$st$	Steigung	[-]
$t$	Zeit	[s]
$t_s$	Abtastzeit (Sampling time)	[s]
$\tau$	Zeitkonstante	[s]
$\tau_{mess}$	Zeitkonstante der Filterung der Strömungsmessung	[s]
$\tau_{SV}$	Zeitkonstante der Strahlventilatoren	[s]
$T$	Zeitkonstante	[s]
$T_{R\_10\%-90\%}$	Anstiegszeit für Pegelwechsel zwischen 10% und 90% des Sollwerts	[s]
$T_{R\_90\%}$	Anstiegszeit ab Regelungsbeginn um 90% des Sollwerts zu erreichen	[s]
$T_{S10\%}$	Einschwingzeit ab Regelungsbeginn auf den Sollwert $\pm 10\%$	[s]
$T_{PID\_i}$	Nachstellzeit des I-Anteils bei einem PID-Regler	[s]
$T_{PID\_d}$	Vorhaltezeit des D-Anteils bei einem PID-Regler	[s]
$T_{PID\_aw}$	Zeitkonstante des Anti-windups	[s]
$T_T$	Temperatur im Tunnel	[K]

Variable	Beschreibung	Dimension
$T_0$	Temperatur der Umgebungsluft	[K]
$T_{\text{Brand}}$	Temperatur des Brandes	[K]
$u$	Stellgrösse (z.B. Strahlventilatoren)	
$v$	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$\Delta v$	Überschwingung der Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{\text{mess}}$	Gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$v_{\text{Fz}}$	Geschwindigkeit der Fahrzeuge	[m/s]
$v_{\text{SV}}$	Ausblasgeschwindigkeit der Strahlventilatoren	[m/s]
$w$	Sollwert (z.B. Strömungsgeschwindigkeit)	
$x_L$	Längenanteil des linken Lüftungsabschnitts	[%]
$y_0$	y-Achsenabschnitt einer Geraden	
$y$	Regelgrösse (z.B. Strömungsgeschwindigkeit)	
$\Delta y$	Überschwingung der Regelgrösse	
$z$	Störgrösse (z.B. Winddruck)	

Tabelle 3 Variablen

**Indizes:**

Index	Beschreibung
0	Umgebung
Abluft	Abluft
ABS	Lokale Absaugung
aw	Anti-Windup
L, R	Abschnitt Links, Rechts
Brand	Brand
C	Steuerung (Control)
d	D-Anteil (PID-Regler)
end	Ende der Sprungantwort (stationär)
Fz	Fahrzeuge
Fz0	Stillstand der Fahrzeuge
Hyd	Hydraulisch
i	I-Anteil (PID-Regler)
Imp	Impuls
ist	Ist-Wert
Kamin	Kamineffekt
krit	Kritischer Wert
Lin	Linearisiert
LW	Lastwagen
LL	Längslüftung
M	Model
max	Maximum
mess	Messung
min	Minimum
Meteo	Meteorologisch
neg	Negativ
O	Offener Regelkreis
p	P-Anteil (PID-Regler)
P	Prädiktion
pos	Positiv

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
PL	Portal Links
PR	Portal Rechts
PT1	Tiefpass 1. Ordnung
PT2	Tiefpass 2. Ordnung
PVL	Portalverlust linkes Portal
PVR	Portalverlust rechtes Portal
PW	Personenwagen
PWE	Personenwageneinheiten
R	Regler
R	Rampe
Reib	Reibung
S	Abtastung (Sampling)
soll	Soll-Wert
spur	Fahrspur
SV	Strahlventilatoren
sym	Symmetrisch
Sys	System
SZ	Schaltzeit
T	Tunnel
TZ	Totzeit
VA	Ventilator Abluft
WP	Wendepunkt
WT	Wendetangente
Zuluft	Zuluft

*Tabelle 4 Indizes*

## Literaturverzeichnis

### Richtlinien:

- 
- [1] Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“, ASTRA 13.001, Ausgabe 2008 V2.01 sowie alle Merkblätter, Stand 2011
- 
- [2] PIARC: „Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation“, 2008
- 

### Regelung in Tunneln:

- 
- [3] A. Mizuno: “An optimal control with disturbance estimation for the emergency ventilation of a longitudinally ventilated road tunnel”, Flucome 1991
- 
- [4] T. Yoshimochi, T. Watanabe: “A ventilation control system using fuzzy control for two-way traffic tunnel in highway”, BHR: 8<sup>th</sup> International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool 1994
- 
- [5] A. Ichikawa: “The Application of Genetic Algorithms to Road Tunnel Ventilation Control”, Doctor Thesis, University of Dundee Scotland, UK, 1998
- 
- [6] M.-N. Marsault, J.-M. Apvrille, J.-C. Martin: “Contrôle Commande de la ventilation, Expérimentation logique floue”, CETU, 2001
- 
- [7] P. Pospisil, R. Brandt: “Smoke Control in Road Tunnels”, Papers presented at the conference “Significance of Tunnels in Transport”, Podbanske, 2004
- 
- [8] J. Porizek, J. Zaparka: “Ventilation control of the blanka tunnel: A Mathematical programming approach”, 4<sup>TH</sup> international conference “tunnel safety and ventilation” 2008, Graz
- 
- [9] A. Vardy: “Automatic control of tunnel portal emissions”, BHR: 11<sup>th</sup> International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern 2003
- 
- [10] H. Tokieda, E. Mori: “Full-scale test for verification to put MPVC into practical use for tunnels with the concentrated exhaust system at portal”, BHR: 12<sup>th</sup> International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Portoroz 2006
- 
- [11] H. Nomura, M. Kobayashi: “Model-based predictive ventilation control in practical use and its evaluation”, BHR: 13<sup>th</sup> International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick 2009
- 
- [12] HBI Haerter AG: “Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall”, Forschungsauftrag Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2010
-

**Regelungstechnik:**

- 
- [13] G. Stein: "Beyond singular values and loopshapes", 1985
- 
- [14] J.C. Doyle *et al.*, "Feedback control theory", Macmillan, 1990
- 
- [15] H. P. Geering, „Regelungstechnik“, 4. Auflage 1996
- 
- [16] K. Zhou, J.C. Doyle, "Essentials of robust control", Prentice Hall, 1999
- 
- [17] A. Dwyer: "PI and PID controller tuning rules for time delay processes: a summary", 1999
- 
- [18] M. Morari, J. Lee, C. Garcia : "Linear Time Invariant System Models", 2000
- 
- [19] L. Guzzella: "Analysis and Synthesis of SISO Control Systems", ETH Zürich, 2006
- 
- [20] J. Hespanha: "LQG/LQR Controller Design", 2007
- 
- [21] R. Dittmar, B.-M. Preiffer: "Modellbasierte prädiktive Regelung", 2004
- 

**Modellierung:**

- 
- [22] I. Riess, M. Bettelini and R. Brandt, "SPRINT: A design tool for fire", 10<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston 2000
- 
- [23] Software: IDA RTV V4.0 Build 5.02; EQUA Simulation SA, Stockholm, Sweden
- 
- [24] Software: MATLAB R2011b; MathWorks
- 

**Weiteres:**

- 
- [25] I. Riess, M. Wehner and R. Brandt, "Time Scales in Road-Tunnel Ventilation", ITC Conference Tunnel Control and Instrumentation, Hongkong, 1999
- 
- [26] I. Riess, R. Brandt: "Längslüftung im Brandfall in Strassentunneln mit Gegenverkehr", VSS 1999
- 
- [27] W. Beitz, K.-H. Grote: „Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, Teil X, Springer 2001
- 
- [28] L. Papula, „Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, 4. Auflage, Vieweg 1994
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11.12.2012

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2010/017\_OBF

Projekttitel: Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall

Enddatum: 31.12.2012

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden die folgenden Regelungen für die Kontrolle der Längsströmung im Brandfall untersucht und verglichen:

- PI- und PID-Regelung
- Model Predictive Control (MPC-Regelung)
- Modellbasierte Regelung („Schrittweise Berechnung zu schaltender Strahlventilatoren“)

Die Arbeit ist weitgehend theoretisch. Die Dynamik der Regelstrecke, bestehend aus Tunnel, Strahlventilatoren und Strömungsmessung wird mit mathematischen Modellen beschrieben. Die verschiedenen Regelungen werden anhand numerischer Simulationsprogramme getestet und miteinander verglichen.

Die MPC-Regelung ist schneller als alle anderen untersuchten Regelungen. Aber sie ist aufwändig, mit einer grossen Zahl einzustellender Parameter. Die Verfügbarkeit von Simulationssoftware mit MPC ist stark eingeschränkt. Bei Systemen mit Rauchabsaugung muss der Brandort in das interne Modell einfließen, was die Komplexität des Reglers zusätzlich erhöht.

PI- und PID-Regelung ist nicht ganz so schnell wie die MPC-Regelung. Anstiegszeit und Überschwingung sind ähnlich wie bei MPC, die Einschwingzeit ist jedoch länger. PI- und PID-Regelung sind deutlich schneller als die „Schrittweise Berechnung“, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung. PI- und PID-Regler sind unabhängig vom Brandort. Die Regler sind praktisch in jeder Simulationssoftware vorhanden. Andernfalls können sie einfach aus mathematischen Bausteinen erstellt werden. Der Einbezug des D-Anteils beim PID-Regler kann bei realen Eingangssignalen zu Problemen führen. Somit hat der PI-Regler gegenüber dem PID-Regler nur Vorteile (kleinere Überschwingung, nur 2 Parameter).

„Schrittweise Berechnung der zu schaltenden Strahlventilatoren“ ist in jeder Hinsicht schlechter als die MPC- und die PI-/PID-Regelung, sowohl beim System Längslüftung als auch beim System mit Absaugung (zum Teil längere Anstiegszeiten, grössere Überschwingungen, sowie längere Einschwingzeiten). Es konnte kein gutes „Rezept“ für die Wahl der Abtastzeit gefunden werden. Die Wahl der Abtastzeit stellt ein Kompromiss zwischen Anstiegszeit und Überschwingung/Einschwingzeit der Regelung dar.

System mit Absaugung: Die Systemantwort bei symmetrischer Regelung hängt entscheidend vom Absaugort ab. Bei Absaugung in der Mitte des Tunnels hat die Regelung wenig bis nichts zu tun (solange keine asymmetrischen Stödrücke vorhanden sind, z.B. Auftrieb oder meteorologische Drücke). Je näher die Absaugstelle bei den Portalen ist, desto stärker muss die Regelung die steigende Asymmetrie ausgleichen.

In den Simulationen hat die „Schrittweise Berechnung der Strahlventilatoren“ die deutlich schlechteste Regelungsqualität erzielt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass mit einer objektspezifischen Optimierung der „Schrittweisen Berechnung“ ein besseres Verhalten erreicht werden kann.

Gegen die Verwendung von MPC-Reglern sprechen praktische Aspekte: So ist die Verfügbarkeit von MPC-Bausteinen in Simulationssoftware und in der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) nicht immer gegeben. Zudem führt die Komplexität des MPC-Reglers zu neuen Unsicherheiten und damit Risiken.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

**Projektziele:**

- Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit in Strassentunneln
- Bestimmung und Vergleich verschiedener Regelungsstrategien zur Kontrolle der Luftströmung im Strassentunnel im Brandfall
- Entwicklung einer robusten Regelung für Strassentunnel mit oder ohne mechanische Absaugung.

Die Ziele wurden erreicht. Die Arbeit ist überwiegend theoretisch. Die Auswirkungen der Ergebnisse auf die praktische Anwendung wird in einem folgenden Forschungsprojekt oder in der zukünftigen Projektierung erfolgen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für die Regelung der Längsströmung im Brandfall wird empfohlen, standardmässig PI-Regler mit Anti-Windup zu verwenden. Aufgrund der einfachen Struktur, der geringen Anzahl Parameter, der Unabhängigkeit vom Brandort und der guten Regelleistung überwiegen die Vorteile der PI-Regelung gegenüber der MPC-Regelung. Wegen der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren in Tunneln ist ein Anti-Windup unerlässlich.

Unabhängig vom verwendeten Regler ist für eine schnelle Regelung entscheidend, dass genügend Lüfterkapazität vorhanden ist. Die benötigte Anzahl Strahlventilatoren während der Regelung kann die Anzahl der erforderlichen Strahlventilatoren im eingeregelter Zustand erheblich übersteigen. Die Tunnellüftung wird jedoch in der Regel für einen stationären Zustand ausgelegt. Dies hat zur Folge, dass im worst-case Szenario dann möglicherweise die Regelung aufgrund der begrenzten Anzahl Strahlventilatoren verlangsamt wird.

Publikationen:

"Regelung der Längsströmung in Strassentunneln im Brandfall", Forschungsbericht

**Der Projektleiter/die Projektleiterin:**

Name: Riess

Vorname: Ingo

Amt, Firma, Institut: HBI Haerter AG

**Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:**

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die im Antrag formulierten Projektziele wurden erreicht. Es fanden drei Sitzungen der Begleitkommission statt. Die Anregungen und Wünsche der Mitglieder der Begleitkommission wurden aufgenommen und im Rahmen der Forschungsarbeit behandelt.

Die Arbeit kommt zum Schluss, dass MPC-Regelung (oder ähnlich komplexe Regelungen) nicht zu empfehlen sind. Gegenüber PI-Reglern sind keine signifikanten Verbesserungen zu erwarten. Die allgemein theoretische Untersuchung kommt zum Schluss, dass PI-Regler gegenüber modellbasierten Reglern generell vorzuziehen sind. In der Praxis werden heute jedoch zum Teil gute Ergebnisse mit objektspezifisch optimierten modellbasierten Reglern erzielt.

Der Forschungsbericht enthält eine klare Zusammenstellung der theoretischen Grundlagen für die Lüftungsregelung. Die Arbeiten werden sehr gut dokumentiert. Der Kostenrahmen des Projektes wurde überschritten. Der zusätzliche Aufwand wird vom Projektverfasser getragen.

##### Umsetzung:

Die theoretischen Erkenntnisse aus der Forschungsarbeit sind in der Praxis zu verifizieren. Die Auswahl zwischen PI-Reglern und modellbasierten Regelungen muss derzeit projektbezogen geschehen. Der Entscheid zur Umsetzung ist Sache des Bauherrn (ASTRA). Für die Parametrierung von PI-Reglern gibt der Forschungsbericht zwei Herleitungen (rechnerisch und durch Messung) an. Beide Ergebnisse sollen bei der Inbetriebsetzung einer Anlage evaluiert und verglichen werden.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

In einer Folgearbeit sollte anhand ausgewählter Objekte das Verhalten mit PI-Regelung und optimierter modellbasierter Regelung gegenübergestellt werden. Anhand eines laufenden Projekts soll der Vergleich gemacht werden. Idealerweise sind pro Tunnel beide Regelungen zu realisieren und zu untersuchen.

##### Einfluss auf Normenwerk:

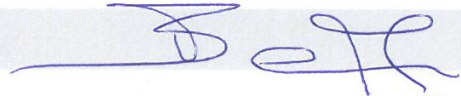
Es besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf betreffend der Vorgaben des ASTRA. Die Angaben zur Parametrierung von PI-Reglern könnten in einem Merkblatt definiert werden.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Berner Vorname: Marcel

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

### Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen Transports de l'avenir? Moteurs et carburants pour la mobilité de demain What drives us on? Drives and fuels for the mobility of tomorrow	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärm mindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology Temps de parcours en réseau urbain Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr L'agressivité au volant Aggressive Driving	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route" Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen Application areas of various means of transportation in agglomerations Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammenreffen von Strassen mit der Schiene Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen On-site runoff experiments on roads Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik IT-Security pour la télématique des transports IT-Security for Transport and Telematics	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) Passage pour piétons (les bases) Pedestrian crossing (basics)	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen Coopération dans les gares et arrêts Coopération at railway stations and stops	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012