

# AERODYNAMISCHE FRAGESTELLUNGEN BEI TUNNELN UND GESCHLOSSENEN STATIONEN AM BEISPIEL DES TRANSRAPID-PROJEKTES IN MÜNCHEN

*Stig Ravn, Peter Reinke, HBI Haerter AG, Schweiz*

## KURZFASSUNG

Der zunehmende Bedarf nach schneller, umweltfreundlicher und sicherer Mobilität erfordert den Bau von Tunneln für den Hochgeschwindigkeitsverkehr. Gegenüber der freien Umgebung können sich in Tunneln ungünstige aerodynamische Verhältnisse für die Reisenden, für die Fahrzeuge sowie für den Tunnel und seine Einbauten ergeben. Ungünstige aerodynamische Auswirkungen können hinsichtlich der nachfolgenden Aspekte bestehen:

- erhöhte mechanischen Beanspruchungen der Tunnelstruktur, der Einbauten und der Fahrzeuge
- Druckschwankungen und Luftströmungen, die von Fahrgästen und Personal im Fahrzeug und / oder in den Warte- und Zugangsbereichen als unangenehm wahrgenommen werden
- Lärmbelästigung der Umgebung von Portalen durch Mikrodruckwellen
- erhöhte Antriebsleistungen

Mit geeigneten baulichen Massnahmen können die aerodynamischen Verhältnisse in Tunneln verbessert werden. Am Beispiel des TRANSRAPID-Projektes in München werden verschiedene aerodynamische Aspekte des Hochgeschwindigkeitsverkehrs und Verbesserungsmassnahmen für Tunnel und unterirdische Stationen erläutert.

## 1 EINLEITUNG

Die Nachfrage nach schneller, umweltfreundlicher und sicherer Mobilität erfordert die Planung und den Bau von Hochgeschwindigkeitsstrecken. Eines dieser geplanten Projekte ist die TRANSRAPID-Magnetschnellbahn in München, die den Hauptbahnhof mit dem Flughafen verbinden soll. Die Strecke wird ungefähr 38 km lang sein und soll mit einer Höchstgeschwindigkeit von 350 km/h befahren werden. Die Fahrzeit wird 10 min betragen.

Die TRANSRAPID-Magnetschwebbahn wird von Linearmotoren angetrieben, die im Fahrweg bzw. im Fahrzeug integriert sind. Konventionelle Gleise sind durch den magnetischen Fahrweg ersetzt, der gleichzeitig die Gewicht-, Führungs- und Beschleunigungskräfte überträgt. Die Gleise sowie die Oberleitung bzw. Stromschienen entfallen und ermöglichen prinzipiell kleinere Tunnelquerschnitte (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: TRANSRAPID Magnetschwebbahnsystems am Münchner Flughafen und im Querschnitt auf dem Fahrweg (Abbildung von BMG)

Der grösste Teil der TRANSRAPID-Strecke verläuft oberirdisch. Die Kopfbahnhöfe an den Streckenenden am Flughafen und am Hauptbahnhof sind unterirdisch angeordnet und werden jeweils durch einen angrenzenden Tunnel erschlossen (Tunnel Flughafen und Tunnel Landshuter Allee). Ein weiterer Tunnel befindet sich im ersten Streckendrittel in der Nähe des Hauptbahnhofes (Tunnel

Feldmoching). Somit weist das Projekt drei Tunnel und zwei unterirdische Kopfbahnhöfe auf. Die vorgeschlagenen Tunnel sind als doppelröhriges, eingleisiges System konzipiert (vgl. Abbildung 2).

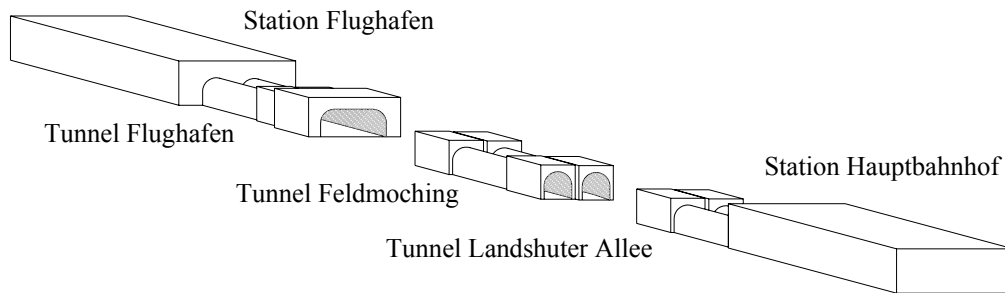


Abbildung 2: Schematische Darstellung der geschlossenen Streckenabschnitte

Geometrische Angaben zu den Tunneln und den Stationen sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Bauwerk	Länge [m]		Freie Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	
	Tagbautunnel	mechanischer Vortrieb	Tagbautunnel	mechanischer Vortrieb
Station Hauptbahnhof	311	-	42	-
Station Flughafen	426	-	42	-
Tunnel Landshuter Allee	160	4'413	60 – 42	42
Tunnel Feldmoching	360	2'180	60	42
Tunnel Flughafen	1'212	-	60/52	

Tabelle 1: Längen und Querschnittsflächen der Tunnel und der Stationen (Zahlenangaben gemäss Konzeptentwurf und ohne Gewähr)

## 2 AERODYNAMISCHE ASPEKTE UND ZIELWERTE

Aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit und des relativ kleinen Tunnelquerschnitts besteht die Möglichkeit, dass die nachfolgenden aerodynamischen Effekte für die Fahrgäste, das Personal, das Fahrzeug und die Tunnelstruktur sowie die Tunnelausrüstung auftreten:

- Verschlechterung des Druckkomforts im Fahrzeug
- Extremere Druckbeanspruchungen der Fahrzeug- und der Tunnelstruktur sowie der Tunnel- bzw. Stationseinbauten
- Auftreten inakzeptabler Mikrodruckwellen am Portal (Portalknall = sonic boom)
- Verschlechterung der Komfortverhältnisse in den unterirdischen Haltebereichen, Bahnsteigen und Zugängen aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten und Druckschwankungen
- Erhöhung der erforderlichen Antriebsleistung der Fahrzeuge

Die Tunnelaerodynamik der TRANSRAPID-Strecke in München wurde untersucht, um die Komfort- und Sicherheitsfragen zu klären sowie die erforderlichen Antriebsleistungen zu ermitteln. Die untersuchten aerodynamischen Aspekte sind in Tabelle 2 aufgeführt und detailliert in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Aspekt	Zielwerte	Ort		
		Fahrzeug	Station	Tunnel / Portal
Gesundheitsgrenzwert für Fahrgäste / Personal aufgrund von extremen Druckabweichungen vom Normaldruck	$\Delta p \leq 10 \text{ kPa}$	*	*	*
Druckkomfort in den Fahrzeugen und in den Tunneln inkl. der unterirdischen Stationen; maximale Druckabweichung vom Normaldruck in Zeitintervall	$\Delta p (\Delta t=1s) \leq 0.5 \text{ kPa}$ $\Delta p (\Delta t=3s) \leq 0.8 \text{ kPa}$ $\Delta p (\Delta t=10s) \leq 1.0 \text{ kPa}$	*	*	
Mikrodruckwellen an den Portalen und Aufweitungen an den unterirdischen Stationen; maximale Druckabweichung vom Normaldruck am Portal	$\Delta p < 20 \text{ Pa}$		*	*
Luftgeschwindigkeit in Bezug auf Komfort	$v_{\max} < 5 \text{ m/s}$ $v_{\text{mittel}} < 3 \text{ m/s}$		*	
Luftgeschwindigkeit in Bezug auf Kräfte auf flächenhafte Einbauten	$F_{\text{Struktur}} > F_{\text{Luft}} [\text{N}]$			*
Aerodynamischer Widerstand für die gewünschte Fahrleistung des Fahrzeuges – Kräfte auf Fahrzeug	$F_{\text{vorhanden}} > F_{\text{erforderlich}} [\text{N}]$	*		*
Drücke auf das Fahrzeug und auf die Tunnelstruktur inkl. der unterirdische Stationen	$P_{\text{Struktur}} > P_{\text{Aerodynamik}} [\text{Pa}]$	*	*	*

Tabelle 2: Untersuchte Aspekte der Tunnelaerodynamik

## 2.1 Gesundheitsgrenze und Komfort in Verbindung mit Druckschwankungen

Ein wesentlicher Komfortaspekt sind die Auswirkungen von Druckschwankungen bei Tunneldurchfahrten. Bei der Durchfahrt von Fahrzeugen durch Tunnel entstehen im Tunnel und im Fahrzeug Druckschwankungen. Diese wirken auf die Hörorgane des Menschen.

Die Druckabweichungen vom Normaldruck werden individuell sehr unterschiedlich wahrgenommen. Während einzelne Personen bestimmte Druckschwankungen bei Tunnelfahrten nicht bemerken, empfinden andere diese schon als ausserordentlich unangenehm. Gegenüber Flugreisen sind bei Bahnfahrten durch Tunnel die Druckschwankungen im Fahrgastraum in der Regel niedriger. Die Veränderungen treten bei Tunnelfahrten aber in einem kürzeren Zeitraum auf (in "Sekunden" statt "Minuten"), wodurch diese Druckschwankungen intensiver wahrgenommen werden.

Die Kriterien für den Druckkomfort werden häufig durch die maximalen Druckschwankungen definiert, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls auftreten dürfen. Mehrere Untersuchungen mit Tests in Druckkammern und zusätzlichen statistischen Untersuchungen mit Tunnelfahrten führten zu verschiedenen Komfortkriterien. Basierend auf den verschiedenen Erkenntnissen hat der Internationale Eisenbahnverband (UIC) Druckkomfortkriterien festgelegt, die für verschiedene Zeitintervalle die maximal akzeptierbaren Druckschwankungen vorgeben [1]. Durch die UIC wurde ebenfalls ein Grenzwert festgelegt, mit dem gesundheitliche Schäden verhindert werden sollen. Die Druckkomfortkriterien für das Münchner TRANSRAPID-Projekt basieren auf diesen Kriterien (vgl. Tabelle 2).

## 2.2 Dichtigkeit der Fahrzeuge

Der Druckkomfort in Fahrzeugen wird durch die Dichtigkeit und Steifigkeit der Fahrzeughülle beeinflusst. Eine gute Dichtigkeit und Steifigkeit kann die Übertragung der an der Fahrzeugaussenseite auftretenden Druckschwankungen in den Fahrgastraum stark dämpfen.

Wesentliche Druckwellen entstehen bei der Durchfahrt der Portale und an Querschnittswechseln eines Tunnels. Die Druckschwankungen breiten sich ausserhalb des Fahrzeuges im Tunnel aus. Die verschiedenen Öffnungsflächen des Fahrzeugs ermöglichen eine Angleichung des Innerendrucks an den Druck im Tunnel (Tür- und Fensterabdichtungen, Leckage durch Klimaanlage, Wagenübergänge, usw.). Die Geschwindigkeit des Druckausgleiches wird durch die Summe aller Öffnungen bestimmt. Grosse Öffnungen bewirken einen rascheren Druckausgleich als kleine, und führen somit zu stärkeren Druckschwankungen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls.

Der Druckdichtigkeitskoeffizient  $\tau$  kann verwendet werden, um die Abdichtungsqualität der Fahrzeuge zu beschreiben. Der Koeffizient beschreibt die Zeit, in welcher eine Differenz zwischen dem inneren und dem äusseren Druck, von 100% auf ca. 38% der ursprünglichen Druckdifferenz gesunken ist. Der Zusammenhang ist in Abbildung 3 gezeigt.

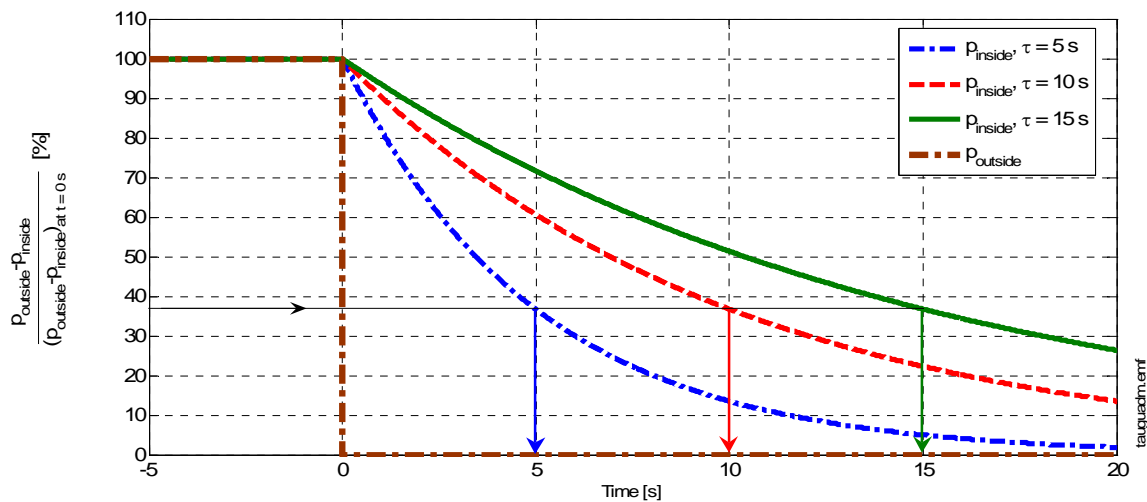


Abbildung 3: Druckverlauf im Fahrgastraum nach einer sprungartigen Druckänderung in der Umgebung des Fahrzeuges zum Zeitpunkt  $t = 0$  s

Die Charakterisierung der Abdichtungsqualität mit einem einzelnen, zeitabhängigen Druckdichtigkeitskoeffizienten  $\tau$  stellt eine erhebliche Vereinfachung dar. In Abhängigkeit vom Ort, dem Druckgefälle, der Zeit und dem Zustand des Fahrzeuges können die  $\tau$ -Werte für die Fahrzeuge stark variieren. Die Auswirkung verschiedene Druckdichtheitskoeffizienten auf den abnehmenden Druckunterschied zwischen der Innen- und Aussenseite des Fahrzeugs sind in Abbildung 3 dargestellt. Typische Dichtheitskoeffizienten sind in Tabelle 3 angegeben.

Fahrzeugabdichtung	Typische Werte des Druckdichtigkeitskoeffizienten $\tau$
nicht abgedichtet (z.B. Regionalzug)	$\tau < 1$ s
minimal abgedichtet (z.B. Eurocity)	$1$ s $< \tau < 6$ s
gut abgedichtet (z.B. ICE1, TGV)	$6$ s $< \tau < 10$ s
sehr gut abgedichtet (z.B. ICE3, TRANSRAPID 09)	$\tau > 10$ s
Bemessungsgrösse für die Bestimmung maximaler Lasten auf die Fahrzeugstruktur	$\tau = \infty$ s

Tabelle 3: Vergleich von typischen Werten für den Dichtheitskoeffizient für verschiedene Bahnfahrzeuge – Grobklassierung ohne Gewähr

Für erste Untersuchungen des TRANSRAPID-Projektes in München wurde für den TRANSRAPID 09 ein Druckdichtigkeitskoeffizient von ca.  $\tau = 15$  s angenommen.

### 2.3 Drucklasten

Die Grösse der Druckabweichungen vom Normdruck in einem Tunnel hängt unter Anderem von der Geschwindigkeit, der Querschnittsfläche, der Länge, der Form und der Rauigkeit der Fahrzeuge ab. Der Tunnel beeinflusst die Druckschwankungen unter anderem durch seine freie Querschnittsfläche, seine Länge, die Wandrauigkeit und seine Verbindungen nach Aussen (Schächte, Zugänge, etc.). Die Druckwellen im Tunnel und der resultierende Druckunterschied zwischen Fahrgastraum und Aussenseite des Fahrzeugs beeinflussen die folgenden Punkte:

- Beanspruchung der Tunneleinbauten
- Kräfte auf die Fahrzeughülle (Wände, Fenster, Tür, Klimaanlage, usw.)
- Druckkomfort für die Benutzer und das Personal
- Funktionalität der Klimaanlagen
- Kräfte auf den Querschlag- und Zugangstüren und Wandabschlüsse
- gegebenenfalls die Tunnelentwässerung und Kabelkanäle

### 2.4 Mikrodruckwellen

Bei der Einfahrt eines Fahrzeugs in den Tunnel wird eine Überdruckwelle erzeugt, die sich mit Schallgeschwindigkeit durch den Tunnel bewegt. Hierbei nimmt der Gradient der Wellenfront zu (Aufsteilung der Druckwelle) und gleichzeitig nimmt die Amplitude der Druckwelle durch Dämpfungseffekte ab. Bei einem ungünstigen Zusammentreffen von Tunnel- und Fahrzeugabmessungen und bestimmten Betriebsbedingungen kann die Druckwelle einen kurzzeitigen Drucksprung verursachen, der am Austrittportal einen lauten, detonationsartigen Knall verursacht (Portalknall = sonic boom; siehe Abbildung 4).

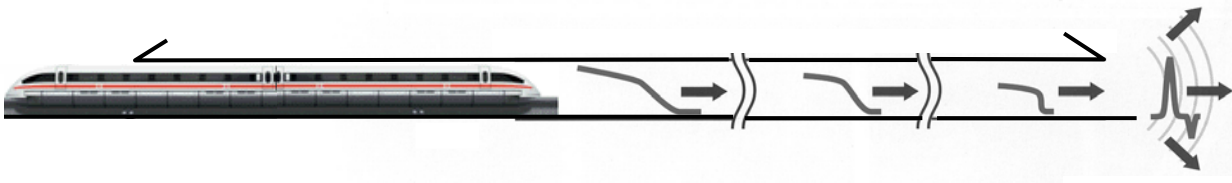


Abbildung 4: Entstehung von Mikrodruckwellen (Portalknall = sonic boom; Illustration von BMG/DB)

Bei jeder Tunneleinfahrt wird eine Eintrittsdruckwelle erzeugt. Nicht-akzeptable Druckschwankungen treten am Austrittsportal insbesondere bei kleineren freien Querschnitten am Einfahrtsportal auf, d.h. bei grossen Versprerrungsmassen (= Querschnittsfläche Fahrzeug / Tunnel). Ausserdem treten extreme Druckschwankungen bei einem dämpfungsarmen Innenausbau auf. Dieses ist beispielsweise bei Bahntunneln mit einer festen Fahrbahn statt mit Schottergleisbetten der Fall. Mit linear zunehmender Fahrgeschwindigkeit steigt die Amplitude der Druckwelle quadratisch an während der Gradient der Druckwellenfront kubisch zunimmt.

Inakzeptable Mikrodruckwellen werden mit Hilfe eines japanischen Erfahrungskriteriums definiert. Als Zielwert wird angestrebt, in einem Abstand von 20 m und in einem Winkel von 45° von der Tunnelachse ausserhalb des Tunnels eine Druckabweichung vom Normaldruck von  $< 20$  Pa zu erreichen.

### 2.5 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit ist hinsichtlich zweier Aspekte von Bedeutung:

- als Komfortkriterium für Fahrgäste und Personal auf dem Bahnsteig und in den Zugängen zur Station und zum Fahrzeug
- hinsichtlich der mechanischen Beanspruchungen von Einbauten im Tunnel (Signaltafeln, Beschilderung)

Aus Komfortgründen sollte die maximale Luftgeschwindigkeit im Zugangs- und Wartebereich von Stationen kleiner als 5 m/s und die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit niedriger als 3 m/s sein.

Hinsichtlich der mechanischen Beanspruchungen von Tunnleinbauten sind insbesondere die Luftströmungen bei der Vorbeifahrt der Fahrzeuge von Bedeutung. Sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten können kurzzeitig und örtlich zwischen dem Fahrzeug und der Tunnelwand bzw. hinter dem Fahrzeug auftreten. Nach Messungen der Deutschen Bahn können bei Versprerrungsverhältnissen, wie diese bei den Tunneln des TRANSRAPID-Projektes in München auftreten, örtlich Luftgeschwindigkeiten in der Grössenordnung der Fahrzeuggeschwindigkeit auftreten, d.h. ca. 250 km/h (vgl. [2]).

## 2.6 Anforderungen an die Antriebsleistung

Der Leistungsbedarf für Fahrzeuge bei Tunnelfahrt wird unter Anderem von folgenden Grössen beeinflusst:

- aerodynamische Widerstandskräfte (Verluste an der Fahrzeugspitze und dem Fahrzeugheck; Verluste durch Längsreibung)
- Rollwiderstandskräfte (gilt nicht für Magnetschwebbahn)
- Gewichtskräfte bzw. Änderungen der potentielle Energie
- Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskräfte
- weiterer Leistungsbedarf für Klimaanlage, etc.

Zur Überwindung dieser Kräfte muss die Antriebsleistung des Fahrzeuges bzw. des Fahrweges ausreichend dimensioniert sein, um die gewünschten Geschwindigkeiten zu erreichen. Je nach Versprerrungsmass, Tunnellänge und weiteren Einflussgrössen kann gegenüber der freien Umgebung in Tunneln eine mehrfache Antriebsleistung erforderlich sein.

## 3 BAULICHE MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER AERODYNAMISCHEN VERHÄLTNISSE

Aerodynamische Berechnungen zu ersten Entwürfen der Magnetbahnstrecke haben verschiedene Verbesserungsnotwendigkeiten aufgezeigt. Iterative Anpassungen waren erforderlich hinsichtlich:

- zu hoher Druckschwankungen, d.h. Druckkomfort nicht gewährleistet
- zu hoher Luftgeschwindigkeiten auf dem Bahnsteig, da Komfortkriterien nicht eingehalten
- inakzeptabler Druckschwankungen der Mikrodruckwellen an den Aussenportalen und an den unterirdischen Stationen

Die oben erwähnten Beispiele der ungünstigen aerodynamischen Verhältnisse mussten durch bauliche Anpassungen der Tunnelgestaltung berücksichtigt werden. Grundlegende Möglichkeiten zur Verbesserung der aerodynamischen Verhältnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

### 3.1 Schächte oder Öffnungen

Schächte oder Öffnungen in einem Tunnelsystem können verschiedene Funktionen haben (vgl. Tabelle 4).

Funktion	Typischer Querschnitt [m <sup>2</sup> ]	Ort im Tunnelsystem
Verbesserungen des Druckkomforts / Druckentlastungsschächte	10	>> 100 m von dem Portal
Luftabfuhr zur Reduzierung der Luftgeschwindigkeit / Schwallenschächte	>> 50	nahe zu der Station

<b>Funktion</b>	<b>Typischer Querschnitt [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Ort im Tunnelsystem</b>
Reduzierung der Mikrodruckwellen / Mikrodruckwellenschächte	10	nah zu dem Portal
Klimaverbesserung / Luftwechselschächte	30 – 50	gegen Rezirkulation: nah zu einer Station oder Portal; für erweiterter Lufttausch: in der Mitte den Tunnels
Rauchabzug und Ventilation / Entrauchungs- bzw. Lüftungsschächte	20	An den Stationen und in dem Tunnel
Notausgang und Rettungsweg / Flucht- und Rettungsschächte	z.B. 8	An den Tunnels und an den Stationen

Tabelle 4: Hauptfunktionen der Schächte in einem Tunnelsystem

### 3.2 Portalgestaltung

Durch die Gestaltung des Einfahrtportals ist es möglich, die Eintrittsdruckwelle hinsichtlich ihrer Amplitude und hinsichtlich des maximalen Gradienten zu verändern. Beispiele von Möglichkeiten zur Beeinflussung dieser Parameter sind:

- trompetenartige Querschnittsaufweitung der Tunnelröhre zu den Portalen hin
- Spalte / längliche Öffnungen / Schächte entlang der Portalbereiche
- gelochte Trennwände zwischen zwei Tunnelröhren oder Öffnungen nach aussen im Portalbereich

Diese Massnahmen können die Form der Eintrittsdruckwelle beeinflussen und neben den Mikrodruckwellen auch die Druckkräfte und den Druckkomfort günstig verändern.

### 3.3 Erweiterung des Tunneldurchmessers

Die Vergrößerung des freien Tunnelquerschnittes entschärft einige unerwünschte aerodynamische Effekte. Jedoch ist eine wirksame Querschnittsvergrößerung in der Regel die kostspieligste Massnahme, die aerodynamischen Verhältnisse zu verbessern.

### 3.4 Vergleich verschiedener Massnahmen

Verschiedenen Massnahmen sind in der Tabelle 5 mit einer qualitativen Abschätzung der Wirksamkeit zusammengefasst und in der Abbildung 5 dargestellt.

<b>Beispiele von baulichen Massnahmen</b>		<b>Verbesserung bezüglich:</b> (+ + = sehr effizient + = effizient 0 = praktisch ohne Einfluss - = ungünstig)						
		<b>Druckkomfort kurze Zeitintervalle</b>	<b>Druckkomfort lange Zeitintervalle</b>	<b>Aerodynamischer Widerstand</b>	<b>Mikrodruckwellen</b>	<b>Luftstrom in den Haltebereichen / Bahnsteigen</b>	<b>Luftstrom in den Eingänge zu den Stationen</b>	<b>Lufttausch in dem Tunnel</b>
1	Öffnungen an den Portalen für gesamthaft ca. 30 m <sup>2</sup> Öffnungsfläche verteilt auf den ersten 100 m des Tunnels	0	0	0	++	0	0	0
2	trompetenartige Portalauftweitung von 40 m <sup>2</sup> auf 100 m <sup>2</sup> verteilt auf den ersten 100 m des Tunnels	+	0	0	++	0	0	0

<b>Verbesserung bezüglich:</b> ( + + = sehr effizient + = effizient 0 = praktisch ohne Einfluss - = ungünstig)		Druckkomfort kurze Zeitintervalle	Druckkomfort lange Zeitintervalle	Aerodynamischer Widerstand	Mikrodruckwellen	Luftstrom in den Haltebereichen / Bahnsteigen	Luftstrom in den Eingänge zu den Stationen	Lufttausch in dem Tunnel
<b>Beispiele von baulichen Massnahmen</b>								
3	Massnahmen 1 und 2 über die ersten 500 m des Tunnels	+	++	0	++	0	0	0
4	Aufweitung des Querschnitts über die gesamte Tunnellänge z.B. von 42 m <sup>2</sup> auf 52 m <sup>2</sup>	++	++	++	++	++	++	-
5	Spalt von 100 m Länge and 0.3 m Breite entlang der ersten 100 m des Tunnels oder verteilte Öffnungen / Mikrodruckwellenschächte	+	0	0	++	0	0	0
6	Gelochte Trennwände entlang der ersten 100 m des Tunnels oder allmähliche Verringerung der Öffnung zwischen zwei Tunnelröhren im Portalbereich	+	0	0	++	0	0	-
7	Öffnungen und/oder zusätzliche Installation von >> 10 m <sup>2</sup> Querschnitte z.B. alle 300 m	+	++	++	++	++	++	-
8	ein 50 m <sup>2</sup> Schacht in der Mitte des Tunnels	++	++	++	+	++	++	-
9	Schwallschächte, d.h.: - ca. 50 m <sup>2</sup> -Öffnungen in den Stationen (a) - vor den Stationen im Tunnel (b)	0 +	0 +	+ +	0 ++	0 ++	++ ++	0 0
10	Schleuse; Drehtür auf dem Stationsbahnsteig bzw. im Zugang	0	0	-	0	0	++	-
11	Verkleinerung des Querschnitts der Tunnelröhre zwischen Schwallschacht und Haltebereiche – ggf. kombiniert mit Öffnungen im Tunnel oder mit einem offenen Querschlag	-	0	-	0	+	+	0
12	Offene Bahnsteige und grosser Abstand zwischen dem Ende des einspurigen Tunnels und dem Bahnsteigbereich; Bereich zwischen dem Bahnsteig und der Tunnelröhre wird mit Umlenkbledchen ausgestattet, die die Luft von einer Tunnelröhre zur anderen führen	0	0	0	0	++	+	0
13	Aerodynamische Entkoppelung des Bahnsteiges und des Fahrwegbereiches durch Bahnsteigtüren	0	0	-	0	++	+	0
14	1 zweigleisige Tunnelröhre statt 2 eingleisige Tunnelröhren	++ / -	++ / -	++	++	++	++	-

Tabelle 5: Mögliche bauliche Massnahmen zur Verbesserung der aerodynamischen Verhältnisse



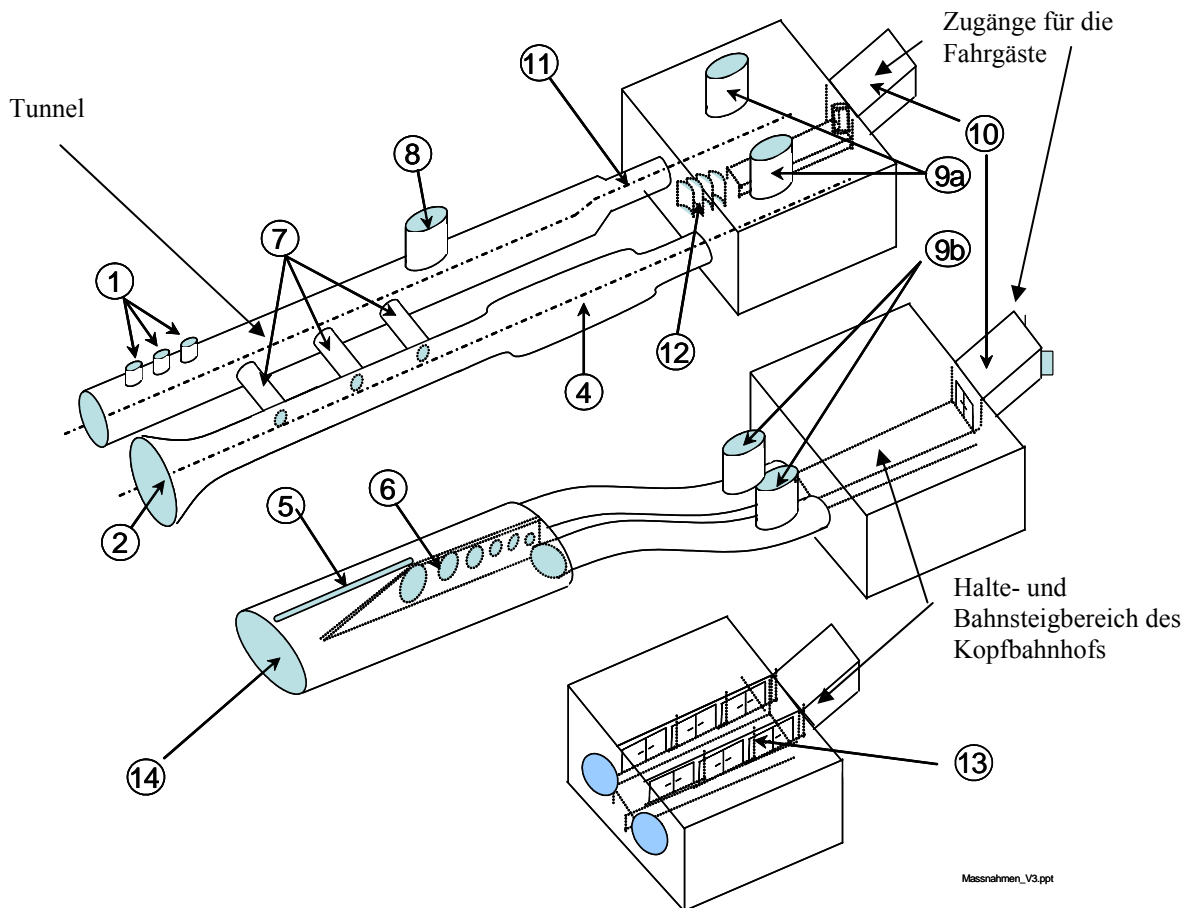


Abbildung 5: Darstellung von baulichen Massnahmen gemäss Tabelle 5

Die erwähnten Massnahmen können unterschiedlich kostspielig sein und/oder können zusätzliche Risiken beinhalten. Beispielsweise können geöffnete Querschläge ohne weitere sicherheitstechnische Massnahmen (Nummer 7) problematisch sein, da sich im Brandfall der Rauch von einer Tunnelröhre zur Parallelröhre ausbreiten kann oder im Normalbetrieb starke Seitenwinde auftreten können. Ein anderes Beispiel betrifft den Unterschied zwischen doppelröhriigen, eingleisigen Tunneln und einröhriigen, zweigleisigen Tunneln. Die aerodynamischen Bedingungen für einen einzelnen fahrenden Zug sind im doppelgleisigen Tunnel aufgrund des grösseren freien Querschnitts weniger extrem, dagegen können Zugbegegnungen zu ungünstigeren Verhältnissen führen.

Von den in Tabelle 5 aufgeführten Massnahmen wurden beim Magnetschwebbahnprojekt in München die folgenden Massnahmen vorgeschlagen (siehe Abbildung 5):

- Nummer 1: mehrere Mikrodruckwellenschächte von ungefähr  $40 \text{ m}^2$  Gesamtquerschnittsfläche an den Portalen, die über die ersten 100 m des Tunnel verteilt angeordnet sind
- Nummer 4: Aufweitung des Tunnelquerschnittes von beispielsweise  $42 \text{ m}^2$  auf bis zu  $52 \text{ m}^2$
- Nummer 9a/b: Schwallenschächte, d.h.  $50 \text{ m}^2$  Öffnungen in den Haltebereichen
- Nummer 10: Luftschleusen für Zugänge von Aussen zum Bahnsteig
- Nummer 13: Bahnsteigtüren zur aerodynamischen Entkoppelung des Bahnsteigbereiches vom Fahrweg

#### 4 AERODYNAMISCHE ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der aerodynamischen Berechnung für einen Konzeptentwurf mit und ohne Massnahmen werden in der folgenden Tabelle 6 aufgeführt. Die Berechnungen wurden unter Anderem mit dem Simulationsprogramm THERMOTUN durchgeführt [3], das für die Simulation der Aerodynamik und Lüftung von Bahn- und U-Bahnsystemen entwickelt wurde.

Ergebnis	Kriterium	Ohne Massnahmen					Mit Massnahmen				
		Tunnel			Station		Tunnel			Station	
		Landshuter Allee	Feldmoching	Flughafen	Hauptbahnhof	Flughafen	Landshuter Allee	Feldmoching	Flughafen	Hauptbahnhof	Flughafen
✓ = erfüllt ✗ = nicht erfüllt											
Gesundheitskriterium	$\Delta p \leq 10 \text{ kPa}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Druckkriterium kurzzeitig	$\Delta p (\Delta t=1s) \leq 0.5 \text{ kPa}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Druckkriterium mittlere Zeitintervalle	$\Delta p (\Delta t=3s) \leq 0.8 \text{ kPa}$	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Druckkriterium Langzeitintervall	$\Delta p (\Delta t=10s) \leq 1.0 \text{ kPa}$	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Maximale Amplitude der Mikrodruckwellen	$\Delta p < 20 \text{ Pa}$	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 6: Ereignisse von den aerodynamischen Berechnungen für eine erste Planungsphase mit und ohne Massnahmen

Tabelle 6 zeigt, dass alle Kriterien mit dem zum Planungszeitpunkt aktuellen Annahmen erfüllt werden konnten. Die Auswirkungen von 3 Massnahmen sind beispielhaft in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

#### 4.1 Auswirkungen einer Aufweitung des Tunnelquerschnittes

Abbildung 6 zeigt die Auswirkung einer Querschnittsvergrößerung des Tunnels Feldmoching auf den Druckkomfort (vgl. Abbildung 5 mit Massnahme Nr. 4 gemäss Tabelle 5).

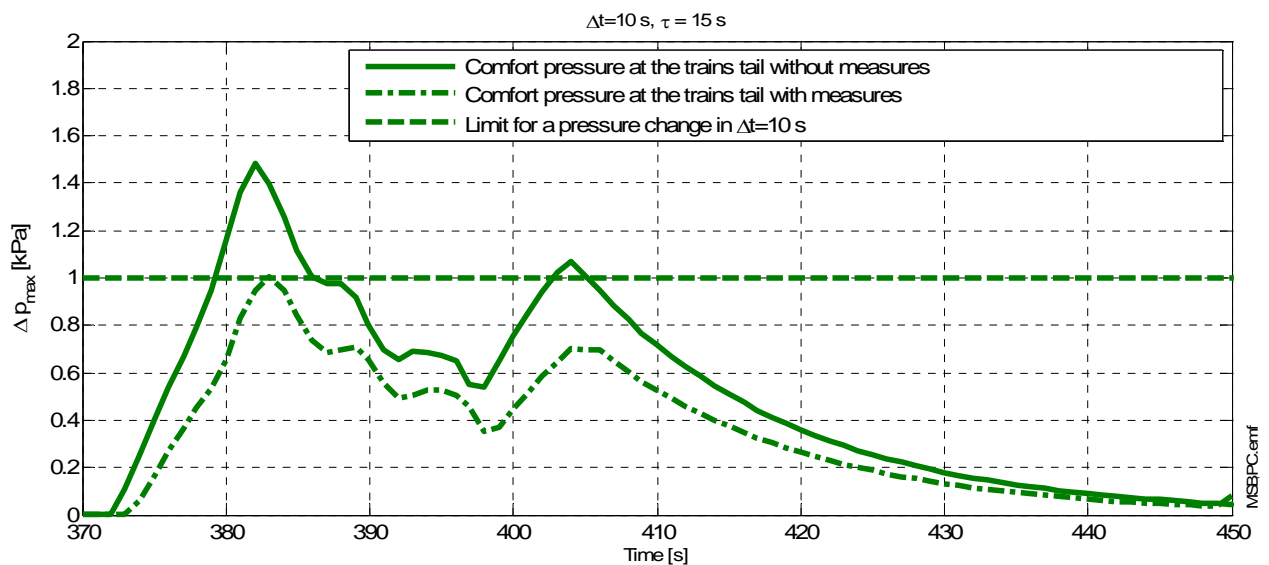


Abbildung 6: Druckkomfort im Tunnel Feldmoching: Maximale Druckschwankungen in einem 10 s Zeitintervall ohne und mit Querschnittserweiterung von  $42 \text{ m}^2$  auf  $52 \text{ m}^2$  am Fahrzeugheck

Wird die Querschnittsfläche des Tunnels vergrössert, so verringern sich die Druckschwankungen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Der Druckkomfort wird verbessert. Zusätzlich werden die

aerodynamischen Beanspruchungen der Tunnleinbauten, der Tunnelstruktur und des Fahrzeuges reduziert. Zudem verringert sich die erforderliche Antriebsleistung.

#### 4.2 Auswirkung von Mikrodruckwellenschächten an den Portalen

Die Auswirkung von Mikrodruckwellenschächten / Öffnungen auf die Amplitude von Mikrodruckwellen am Ausfahrtsportal des Tunnels Feldmoching ist in der Tabelle 7 (mit Massnahme Nr. 5 gemäss Tabelle 5) dargestellt.

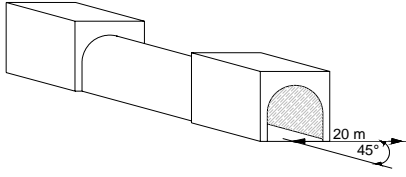
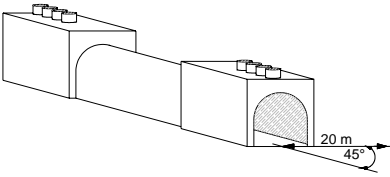
Druckamplitude in einen 20 m Abstand und in einem 45° Winkel von Ausfahrtsportal			
Ohne Massnahmen		Mit Massnahmen (2 x 4 x 10 m <sup>2</sup> Öffnungen)	
	Süd Portal 35 Pa		Süd Portal 7 Pa
	Nord Portal 35 Pa		Nord Portal 9 Pa

Tabelle 7: Mikrodruckwellen ausserhalb des Tunnels Feldmoching (Schacht/Öffnungen am Portaleingang; Kriterium im Abstand von 20 m vom Portal und in einem 45° Winkel zur Tunnelachse)

Durch die Mikrodruckwellenschächte am Einfahrtsportal wird die Grösse der Mikrodruckwellen am Ausfahrtsportal gesenkt.

#### 4.3 Auswirkungen der Schwallenschächte auf die Druckschwankungen in der Station

Abbildung 7 zeigt die Wirkung des Schwallenschachtes und der weiteren Massnahmen auf die Druckschwankungen im Tunnel Landshuter Allee und den Haltebereich der Station Hauptbahnhof (Massnahmen Nummer. 9a, 4 und 1 gemäss Tabelle 5).

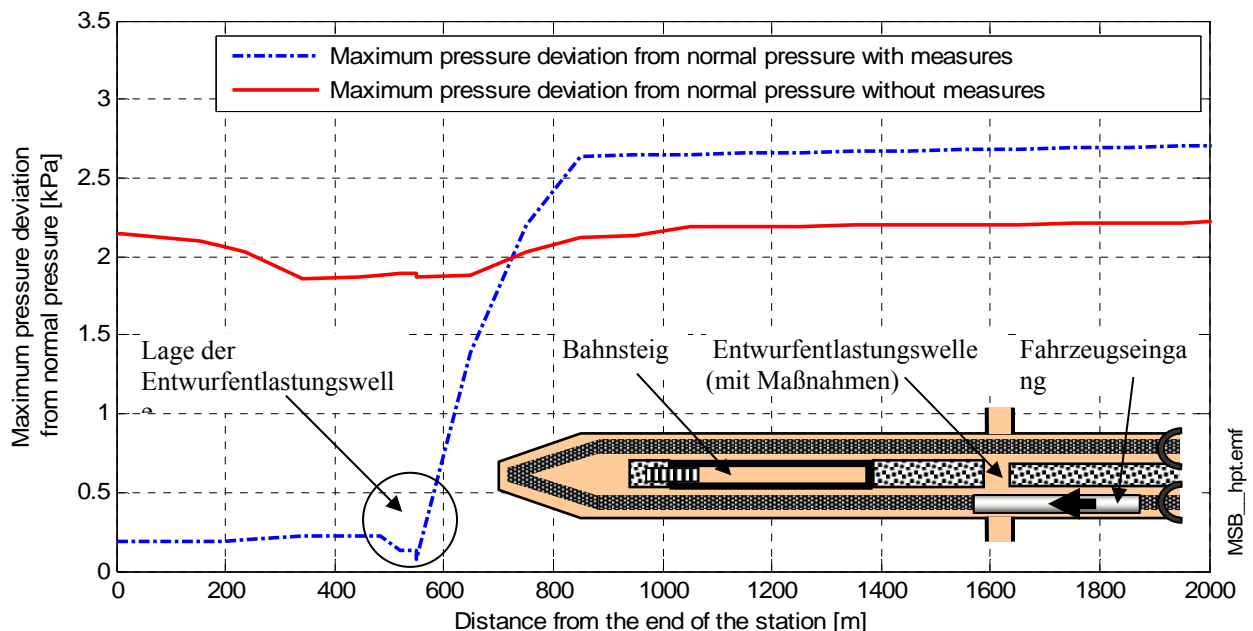


Abbildung 7: Maximale Druckabweichung vom Normaldruck entlang des Tunnels Landshuter Allee und in der Station Hauptbahnhof im Verlauf der Durchfahrt einer Magnetschwebebahn

Aufgrund des Schwallbauwerkes im Übergangsbereich vom Tunnel Landshuter Allee zur Station Hauptbahnhof treten im Halte- bzw. Bahnsteigbereich deutlich geringere Druckschwankungen auf als

in der Tunnelstrecke. Die geringeren Druckabweichungen vom Normaldruck im Stationsbereich verringern die Luftgeschwindigkeiten auf dem Bahnsteig und in den Zugängen.

## **5 ZUSAMMENFASSUNG**

Bei der Planung von Hochgeschwindigkeitstunneln bilden aerodynamische Untersuchungen eine wichtige Grundlage für die Gestaltung der Bauwerke. Wenn unerwünschte aerodynamische Verhältnisse wie nicht akzeptable Druckschwankungen, zu hohe Luftgeschwindigkeiten, Lärm von Mikrodruckwellen (Portalknall) oder extreme Anforderungen an die Antriebsleistung am Fahrzeug auftreten, können diese nach der Inbetriebnahme der Bauwerke nur mit grossen Kostenaufwand korrigiert oder mit betrieblichen Einschränkungen kompensiert werden.

Die hier aufgeführten Fragestellungen zur Tunnelaerodynamik gelten sowohl für Magnetschwebebahnen als auch generell für den Hochgeschwindigkeitsverkehr bzw. für Bahntunnel. Einzelne Eigenschaften der Magnetschwebebahnen einschliesslich des TRANSRAPID-Projektes in München begünstigen extremere aerodynamische Verhältnisse:

- Kleinerer freier Querschnitt wegen Wegfall von Fahrleitungen möglich, was sich auf den Druckkomfort, die erforderliche Antriebsleistung, die Beanspruchungen der Fahrzeuge, der Tunnelstruktur und der Einbauten auswirkt
- Grössere mögliche Steigungen und grosse mögliche Beschleunigungen und Verzögerungen, die zu extremeren Druckschwankungen führen können
- Fahrbahn und Tunnelinnenausbau mit wenig dämpfenden Eigenschaften (im Ggs. zu Schottergleisbett), was extremere Mikrodruckwellen begünstigt
- Möglichkeit für sehr hohe Geschwindigkeiten ( $\gg 250$  km/h)

Mit baulichen Massnahmen lassen sich die Beanspruchungen und Anforderungen an das Fahrzeug erheblich entschärfen. Die für das Magnetschwebebahnprojekt in München vorgeschlagenen Massnahmen erhöhen für die Fahrgäste und das Personal den Komfort und die Sicherheit und verringern die Kosten für den Antrieb. Optimierungen können nur durch die Abstimmung zwischen der Planung des Fahrzeuges und den Tunnelbauten erfolgen.

## **6 DANKSAGUNG**

Die Autoren bedanken sich bei der Bayerischen Magnetbahnvorbereitungsgesellschaft (BMG) in München für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der vorliegenden Projektangaben. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die Angaben dieses Beitrags auf eine bestimmte Entwurfsphase beziehen und möglicherweise nunmehr nicht mehr relevant und/oder korrekt sind.

## **7 QUELLENANGABEN**

- [1] UIC, "Arrangements to ensure the technical compatibility of high speed trains", UIC leaflet 660, 2<sup>nd</sup> edition, 2002
- [2] Deutsche Bahn, "Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten", Regelwerk D853, August 2003
- [3] Thermotun, Version 5.2, 2004, Prof. Alan Vardy, UK