

Diplomarbeit



Grenzen der 0D/1D-CFD-Simulation bei der Abbildung komplexer Geometrien im Luftpfad von Verbrennungskraftmaschinen

Jochen PRAMHAS

Matrikelnummer: 0530322

Studienkennzahl: F 748

eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
an der Technischen Universität Graz

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut EICHLSEDER

Einreichdatum: 09.12.2010

Betreuender Professor: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund ALMBAUER

Betreuende Assistenten: Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan SCHMIDT

Dipl.-Ing. Martin ABART

Geheimhaltung bis 2013

Vorwort

Diese Diplomarbeit entstand im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik im Rahmen des K-Projektes Eco Powerdrive.

Ich möchte mich beim Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder und dem Leiter des Forschungsbereiches Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Roland Kirchberger, die mir die Möglichkeit diese Diplomarbeit durchzuführen eröffnet haben, bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer, der in seiner Funktion als betreuender Professor die wichtigste Ansprechperson für diese Arbeit war. Speziell hervorheben möchte ich an dieser Stelle die spannenden Diskussionen, für die er trotz seiner knapp bemessenen Zeit stets zur Verfügung stand.

Des Weiteren gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Schmidt und Herrn Dipl.-Ing. Martin Abart deren fachliche Unterstützung ebenfalls sehr zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Außerdem möchte ich das sehr angenehme Arbeitsklima sowie den freundschaftlichen Umgang im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung erwähnen und mich dafür bei allen Kollegen bedanken.

Meinen Eltern möchte ich für Ihre Unterstützung während des gesamten Studiums vor allem aber auch für ihre Geduld und ihr Verständnis in der Endphase desselben danken.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Freunden, die vor allem in den letzten, sehr arbeitsintensiven und zum Teil anstrengenden Monaten für die nötige Ablenkung gesorgt haben.

Jochen Pramhas, Graz, im November 2010

Kurzfassung

Im Zuge dieser im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz entstandenen Arbeit wurden Ansätze zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildungsmöglichkeit von komplexen Geometrien im Luftpfad von Verbrennungskraftmaschinen entwickelt und überprüft.

Auf Basis vorhandener 0D/1D- bzw. gekoppelter 1D/3D-Simulationsmodelle eines ausgeführten Motorkonzeptes wurden zunächst für diese Abschätzung relevante, räumliche Strömungsphänomene analysiert. Mit den daraus resultierenden Erkenntnissen wurden, zum oben genannten Zweck, Methoden, welche sich sowohl der 0D/1D- als auch der 3D-CFD-Simulation bedienen, entwickelt und mit geeigneten Evaluierungsmaßnahmen bewertet. Des Weiteren konnte durch eine Vielzahl von Variationsrechnungen eine Annäherung der vorhandenen 0D/1D-Abbildung an die gekoppelten Motormodelle erzielt werden.

Darüber hinaus wurde dem aus der Analyse resultierenden Erfordernis nach einer näheren Auseinandersetzung mit der gekoppelten 1D/3D-Motorprozessrechnung nachgekommen. Mit den in diesem Rahmen durchgeführten Untersuchungen konnte eine, unter bestimmten Voraussetzungen, fehlerhaft funktionierende Schnittstelle zwischen 0D/1D- und 3D-Modell nachgewiesen werden, die unter anderem zu einer völlig neuen Interpretation dieser Ausgangsmodelle bzw. deren Ergebnissen führt.

Abstract

In the course of this thesis, which was realized at the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics at Graz University of Technology, research area design, different approaches for the estimation of the possibility to model complex geometries in the intake system of internal combustion engines with zero- or one-dimensional simulation tools, were developed and tested.

At first, estimation relevant three-dimensional flow effects were analyzed based on existing 0D/1D- and coupled simulation models of a real engine concept respectively. Based on the findings of this analysis, methods using 0D/1D as well as 3D-simulation tools were developed, assessed, and verified. Furthermore, an improvement of the primary 0D/1D-engine model succeeded.

Another outcome of the analysis was the demand to deal with coupled 1D/3D simulation models in a very detailed way. By means of investigations in this context malfunctions concerning the interface between the 0D/1D- and the 3D-model were detected. These findings led to a new interpretation of the results of existing coupled simulation models.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation und Aufgabenstellung	4
2	Allgemeine Grundlagen	5
2.1	Numerische Strömungsmechanik	5
2.1.1	Erhaltungsgleichungen	6
2.1.1.1	Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)	7
2.1.1.2	Impulserhaltung (Strömungsgleichung)	7
2.1.1.3	Erhaltung einer skalaren Größe	8
2.1.1.4	Energieerhaltung	8
2.1.2	Berücksichtigung der Turbulenz	9
2.1.2.1	Statistische Behandlung der Turbulenz	9
3	Softwarespezifische Grundlagen	12
3.1	0D/1D-Motorprozessrechnung mit AVL Boost	12
3.1.1	0D/1D-Komponenten	12
3.1.1.1	Pipe	12
3.1.1.2	System Boundary (SB)	13
3.1.1.3	Internal Boundary (IB)	14
3.1.1.4	Plenum	14
3.1.1.5	Junction	16
3.2	Grundlagen der gekoppelten 1D/3D-CFD-Simulation	17
3.2.1	Fire-Boost-Interaktion	17
4	Rotax 804 mit Zweivolumenansaugtrakt	20
4.1	Analyse der vorhandenen Daten	20
4.1.1	Analyse der räumlichen Verteilung der Strömungsgrößen	22
4.1.2	Analyse der zeitlichen Verläufe der Strömungsgrößen	24
4.1.3	Vergleich der beiden gekoppelten 1D/3D-Motormodelle	28
4.2	Weitere gekoppelte 1D/3D-Motormodelle	36
4.2.1	DI-Modelle	36
4.2.2	MPFI-Modelle mit verschobenen Koppelstellen	39
4.2.3	SPFI-Modelle	40
4.2.4	Einfluss der Integrationsvolumina	41
4.2.5	Resümee über gekoppelte 1D/3D-Motormodelle	42
4.3	0D/1D-Alternativmodelle	44
5	Bewertungsmethoden zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit	46
5.1	Betrachtete Geometrien	47
5.1.1	Y-Verteiler	47
5.1.2	Würfel-Verteiler	48
5.1.3	804-V2	48
5.1.4	804-V2*	49
5.2	Verifizierung der Methoden	50
5.2.1	Y-Verteiler	50
5.2.2	Würfel-Verteiler	51
5.2.3	804-V2	52

5.2.4	804-V2*	52
5.3	Stoßwellenbeaufschlagung	53
5.3.1	Würfel-Verteiler	53
5.3.2	Würfel-Verteiler	56
5.3.3	804-V2	57
5.3.4	Resümee zur Stoßwellenbeaufschlagung	58
5.4	Harmonische Druckwellenbeaufschlagung	59
5.4.1	Y-Verteiler	61
5.4.1.1	3D-Modell	61
5.4.1.2	0D/1D-Modell	63
5.4.1.3	Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe	63
5.4.1.4	Auswertung	65
5.4.2	Würfel-Verteiler	68
5.4.3	804-V2	69
5.4.4	804-V2*	70
5.4.5	Resümee zur Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung	74
5.5	Massenstrombeaufschlagung	75
5.5.1	804-V2	76
5.5.1.1	3D-Modell	76
5.5.1.2	0D/1D-Modell	77
5.5.1.3	Auswertung	77
5.5.2	804-V2*	80
5.5.3	Y-Verteiler	81
5.5.4	804_V2* vs. Y-Verteiler	83
5.5.5	Resümee zur Massenstrombeaufschlagung	84
5.6	Abschließende Untersuchungen	85
5.6.1	Untersuchungen am Shadow-Netzwerk	85
5.6.2	Massenstrombeauschlagung eines Konus	85
5.6.3	Inverse Massenstrombeaufschlagung	88
6	Fazit	90
7	Abbildungsverzeichnis	92
8	Tabellenverzeichnis	94
9	Literaturverzeichnis	95

Begriffserklärung

Runner		Saugrohr
WOT		Volllast (<u>W</u> ide <u>o</u> pen <u>t</u> hrottle)
DI		Direkteinspritzung (<u>D</u> irect <u>I</u> njection)
MPFI		Dezentrale Saugrohreinspritzung (<u>M</u> ulti <u>P</u> oint <u>F</u> uel <u>I</u> njection)
SPFI		Zentrale Saugrohreinspritzung (<u>S</u> ingle <u>P</u> oint <u>F</u> uel <u>I</u> njection)
φ	[°KW]	Kurbelwinkel
IMEP	[bar]	Indizierter Mitteldruck (<u>I</u> ndicated <u>M</u> ean <u>E</u> ffective <u>P</u> ressure)
n	[1/min]	Drehzahl

Modellbezeichnungen

804_0D/1D	0D/1D-Motormodell der 804-Zweivolumenvariante, welches sowohl Primär- als auch Sekundär volumen durch ein nulldimensionales Volumen (Plenum) abbildet
804_Koppelung_V2	Gekoppeltes 1D/3D-Motormodell der 804-Zweivolumenvariante bei welchem die Saugrohre (Runner) sowie das Sekundär volumen dreidimensional abgebildet werden
804_Koppelung_V1+V2	Wie 804_Koppelung_V2 allerdings wird zusätzlich auch das Primär volumen und das zwischen diesem und dem Sekundär volumen gelegene Verbindungsrohr inkl. Drosselklappe dreidimensional abgebildet
804_0D/1D_DI	Wie 804_0D/1D allerdings mit Direkteinspritzung statt Saugrohreinspritzung
804_0D/1D_JunctionModell_F_DI	Wie 804_0D/1D_DI allerdings wird das Sekundär volumen durch ein Rohr und eine Rohrverzweigung (Junction) abgebildet
804_0D/1D_JunctionModell_J_DI	Wie 804_0D/1D_JunctionModell_F_DI allerdings mit anderen Abmessungen jenes Rohres, welches das Sekundär volumen abbildet
804_Koppelung_V2_DI	Wie 804_Koppelung_V2 allerdings mit Direkteinspritzung statt Saugrohreinspritzung
804_Koppelung_V1+V2_DI	Wie 804_Koppelung_V1+V2 allerdings mit Direkteinspritzung statt Saugrohreinspritzung
804_Koppelung_Y-Verteiler_DI	Wie 804_Koppelung_V2_DI allerdings wird statt dem ursprünglichen Sekundär volumen der Y-Verteiler verwendet
V2-Plenum-Modell	In 804_0D/1D verwendete Abbildung des Sekundär volumens
V2-Junction-Modell_J	In 804_0D/1D_JunctionModell_J_DI verwendete Abbildung des Sekundär volumens

1 Einleitung

In diesem Kapitel soll die Problemstellung, die zur vorliegenden Arbeit geführt hat, beschrieben werden. Dazu wird zunächst in Kapitel 1.1 die Ausgangssituation skizziert, um anschließend, in Kapitel 1.2, die daraus resultierende Motivation sowie die damit einhergehende Aufgabenstellung abzuleiten.

1.1 Ausgangssituation

Den Anstoß für diese Diplomarbeit gab unter anderem ein Industrieprojekt, welches vom Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik in Zusammenarbeit mit der Fa. BRP-Powertrain GmbH & Co. KG durchgeführt wurde und die Auslegung einer Ansaug- sowie einer Abgasanlage eines Vierzylinder-Viertakt-Ottomotors zum Inhalt hatte [13]. Im Rahmen dieses Projektes wurden für einen bestehenden Zweizylinder-Viertakt-Ottomotor mit der internen Werksbezeichnung 804 [9], welcher als Ausgangsbasis für den oben erwähnten Vierzylindermotor dienen sollte, sowohl simulatorische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dieser Motor wird im Folgenden auch als 804-Basisvariante bezeichnet.

Auf Grund der Rahmenbedingungen, die eine echte Herausforderung darstellten – es sollte, aus Kostengründen, mit einer einzigen Drosselklappe das Auslangen gefunden werden, ohne Einbußen im Ansprechverhalten hinnehmen zu müssen – ergab sich ein neues Ansaugtraktkonzept. Auffälligstes Merkmal dieser neuen Ausführung ist der Ersatz des großen Einzelvolumens (Air Box) durch ein Primär- und ein Sekundärvolumen (siehe Abbildung 1-1). Wobei sich ersteres vor der Drosselklappe befindet und ausreichend groß dimensioniert sein sollte, um eine gute Füllung der Zylinder (hohen Liefergrad) zu gewährleisten, während letztgenanntes nach der Drosselklappe positioniert ist und daher möglichst klein ausgeführt werden sollte, um ein gutes Ansprechverhalten sicherzustellen.

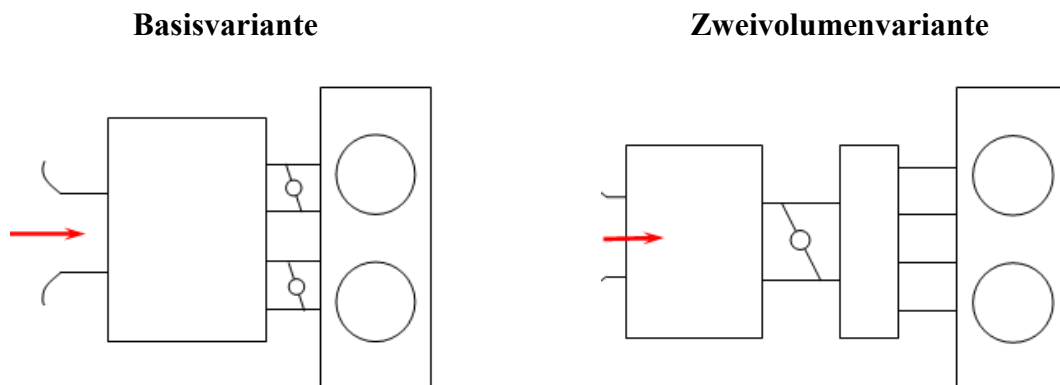


Abbildung 1-1: Ansaugtraktkonzepte

Die oben genannten Ziele sowie Packaginganforderungen führten zu einer – verglichen mit der Ausgangsbasis - komplexen Geometrie des Luftpfades. Dies gilt vor allem für das in Abbildung 1-2 ersichtliche Sekundärvolumen. Neben der Ausführung für den Vierzylinder- (orange) ist auch ein, auf einen Zweizylindermotor (grün) skaliertes, Sekundärvolumen

dargestellt. Der Grund für die, parallel zur Auslegung des Vierzylinder-Zweivolumenansaugtraktes, durchgeführten Untersuchungen am Zweizylindermotor geht aus den folgenden Erklärungen hervor.

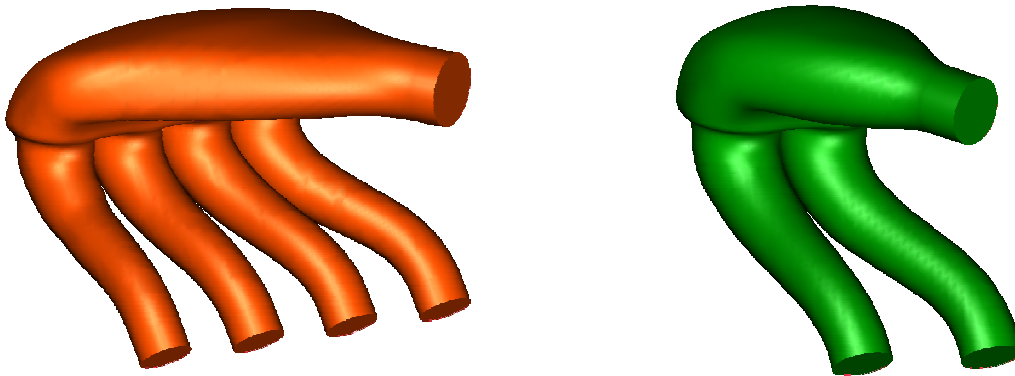


Abbildung 1-2: Sekundär volumen für einen Zwei- und Vierzylindermotor

Da die klassische 0D/1D-Motorprozessrechnung, aus Gründen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch ausführlich erläutert werden, bei derart kleinen und komplex geformten Volumina problematisch ist, wurde die Methode der gekoppelten 1D/3D-CFD-Simulation herangezogen. Genauer gesagt, wurde eine Koppelung der Programme AVL Boost (0D/1D) und AVL Fire (3D) verwendet, wobei eine 3D-Beschreibung des Rechengebietes mit AVL Fire lediglich für die bereits angesprochenen, komplexen Geometrien des Ansaugtraktes erfolgte, während das restliche System mit AVL Boost null- bzw. eindimensional abgebildet wurde.

Da es in diesem Entwicklungsstadium noch keinen Prototyp des Vierzylindermotors gab, auf eine Verifizierung der gekoppelten Simulationsmethode mit Motorprüfstandsdaten aber nicht verzichtet werden konnte, erfolgte eine Skalierung des komplexen Zweivolumenansaugtraktes auf die 804-Basisvariante. Um für die Kombination der 804-Basisvariante mit einem Zweivolumen-Ansaugtrakt, im Folgenden auch 804-Zweivolumenvariante genannt, nun experimentelle Untersuchungen durchführen zu können, wurde, wie aus Abbildung 1-3 ersichtlich, das Sekundär volumen mit Hilfe von Rapid Prototyping hergestellt, während die serienmäßige Air Box der 804-Basisvariante als Primär volumen diente.

Zunächst wurde für die 804-Zweivolumenvariante neben einem 0D/1D-Modell (804_0D/1D) ein gekoppeltes 1D/3D-Modell (804_Koppelung_V2) erstellt, welches nur das Sekundär volumen und die Runner (Verbindungskanäle zwischen Sekundär volumen und Zylinderkopf) dreidimensional abbildete. Da die Ergebnisse, welche dieses Modell hinsichtlich IMEP liefert, bei einigen Drehzahlen doch beträchtlich von den am Motorprüfstand ermittelten Werten abweichen, wurde ein weiteres gekoppeltes 1D/3D-Modell, 804_Koppelung_V1+V2, aufgebaut. Dieses sieht, neben dem Sekundär volumen und den Runnern, auch für das Primär volumen und das, zwischen Primär- und Sekundär volumen liegende, Verbindungsrohr, inklusive Drosselklappe, eine 3D-Berechnung vor. Mit diesem erweiterten Modell konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erreicht werden. Die Abweichungen zwischen den beiden gekoppelten 1D/3D-Modellen wurden auf dreidimensionale Strömungseffekte im Primär volumen bzw. im

Verbindungsrohr zum Sekundärvolumen, die nur vom Modell 804_Koppelung_V1+V2 erfasst werden, zurückgeführt.

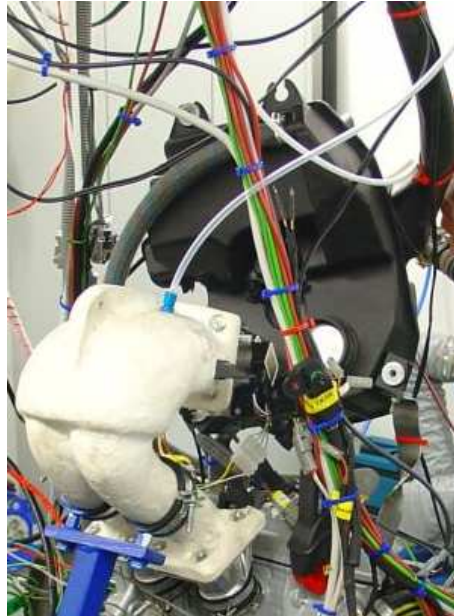


Abbildung 1-3: Prototyp des Zweivolumenansaugtraktes für den Zweizylindermotor

1.2 Motivation und Aufgabenstellung

Wie oben beschrieben und auch aus der Literatur [6] und [11] bekannt ist, hat sich die Koppelung der 0D/1D-Motorprozessrechnung mit der 3D-CFD-Methode für die Simulation des Arbeitsprozesses von Verbrennungskraftmaschinen, deren Ansaugtraktgeometrien komplexe Formen aufweisen, als sehr hilfreiches Element im Entwicklungsprozess herausgestellt. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass die gekoppelte 1D/3D-CFD-Simulation, natürlich abhängig von der Größe bzw. insbesondere von der Zellenanzahl des 3D-Bereichs, zu Rechenzeiten führt, die um Größenordnungen über jenen der 0D/1D-Methode liegen. Infolgedessen sollte die 1D/3D-Koppelung wirklich nur dann zum Einsatz kommen, wenn Strömungsphänomene, deren Beschreibung mit null- bzw. eindimensional aufgelösten Gleichungen nicht realitätsnah möglich ist, zu erwarten sind. Um eine Entscheidung bezüglich des effektivsten Simulationswerkzeuges vorab treffen zu können, wäre eine Methode erforderlich, die alleine auf Grund der Geometrie des Ansaugtraktes sowie einiger grundlegender Motorkenngrößen (Hubraum, Drehzahlbereich, ...) eine Aussage über die 0D/1D-Abbildungsmöglichkeit liefert. Selbstverständlich ist von einer solchen Methode neben einer hohen Zuverlässigkeit der Ergebnisse auch ein Aufwand, der deutlich unter jenem einer gekoppelten 1D/3D-CFD-Rechnung liegt, zu fordern.

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es Überlegungen anzustellen wie eine solche Methode grundsätzlich aussehen könnte, mit den daraus hervorgehenden Ansätzen einzelne Geometrien hinsichtlich ihrer 0D/1D-Abbildbarkeit zu bewerten und anhand der Bewertungsergebnisse sowie geeigneter Evaluierungsdaten die Ansätze zu verifizieren. Um einerseits einen Anhaltspunkt, was die räumlichen Strömungsphänomene in derart komplex geformten Geometrien betrifft, zu haben und andererseits die angestrebte Verifizierung der Methoden mit Motorprüfstandsdaten durchzuführen, wurden die Simulationsmodelle des in Kapitel 1.1 vorgestellten Motorkonzeptes, 804-Zweivolumenvariante, als Ausgangsbasis für sämtliche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen herangezogen.

2 Allgemeine Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die theoretische Basis, die den für diese Arbeit verwendeten Programmen, AVL Boost und AVL Fire, zugrunde liegt, eingegangen. Aus dem Forschungsbereich der Verbrennungskraftmaschinen werden in den folgenden Kapiteln nur sehr elementare Begriffe verwendet, weshalb auf eine Darstellung der Grundlagen aus diesem Bereich verzichtet und statt dessen auf die einschlägige Literatur [7] und [8] verwiesen wird.

2.1 Numerische Strömungsmechanik

Infolge der stetig steigenden Rechenleistung von Prozessoren, kommt es seit Jahren zu einer starken Verbreitung der numerischen Methoden in sämtlichen Ingenieursdisziplinen. Eine von ihnen ist die Strömungsmechanik, deren Gleichungen zur mathematischen Beschreibung konkreter Problemstellungen nur in Spezialfällen analytisch gelöst werden können. Deshalb stellten sowohl zeitlich als auch finanziell aufwändige, experimentelle Untersuchungen lange Zeit die einzige Möglichkeit zur Lösung komplexer Aufgabenstellungen dar. Die numerischen Methoden, die als Ergebnis die interessierenden Größen, wie Drücke, Temperaturen oder Geschwindigkeiten in Form von zeitabhängigen, räumlichen Verteilungen liefern, sind nicht nur im Allgemeinen derzeit bereits kostengünstiger als aufwändige Versuche, sondern weisen eine Vielzahl weiterer Vorteile auf (keine Skalierungsprobleme, Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, ...). Keineswegs soll damit aber der Eindruck entstehen, die numerische Strömungsmechanik, kurz CFD (Computational Fluid Dynamics), würde alle Experimente überflüssig machen. So können beispielsweise geeignete Randbedingungen häufig nur durch Messungen an Versuchsträgern ermittelt werden. Darüber hinaus sind Untersuchungen am realen, abzubildenden System für die Verifizierung der Simulationsmodelle unumgänglich. Dies gilt um so mehr, desto spezieller die Anwendungsfälle sind. Bei all den Möglichkeiten, welche sich durch die Anwendung der numerischen Methoden eröffnen, sollte man sich unbedingt auch der Grenzen bzw. der daraus resultierenden Nachteile bewusst sein. So führt die, entsprechend der verfügbaren Rechenkapazität, begrenzte räumliche und zeitliche Auflösung des Rechengebietes prinzipbedingt zu Diskretisierungsfehlern. Die weite Verbreitung der CFD-Simulation ist allerdings ein Beleg dafür, dass die Vorteile dieser Methoden in zahlreichen Anwendungsgebieten überwiegen. Auch was die Forschung und Entwicklung im Bereich der Verbrennungskraftmaschinen betrifft, ist bereits heute ein mannigfaltiger Einsatz der numerischen Berechnungsverfahren feststellbar. Von einer weiteren Steigerung in den nächsten Jahren ist, auf Grund zukünftig noch leistungsfähigerer Computer sowie maßgeschneiderter, benutzerfreundlicher Softwaretools, auszugehen. [1]

In diesem Kapitel soll zunächst ein Überblick über die, allen strömungsmechanischen Betrachtungen zugrunde liegenden, Erhaltungsgleichungen gegeben werden. Anschließend wird auf die Behandlung der Turbulenz, der in Hinblick auf den praxisrelevanten Einsatz der CFD-Simulation große Bedeutung zukommt, eingegangen.

2.1.1 Erhaltungsgleichungen [1]

Die Basis aller mit Hilfe der numerischen Simulation ermittelten Ergebnisse liegt in der Lösung der Bilanzgleichungen für Masse, Impuls, Energie und Massenbruch. Diese Gleichungen sind durch eine einheitliche Form gekennzeichnet, was sich aus der gemeinsamen Aufgabe, die Erhaltung einer physikalischen Größe in Bezug auf ein beliebig gewähltes Betrachtungsvolumen zu beschreiben, erklärt (siehe Abbildung 2-1).

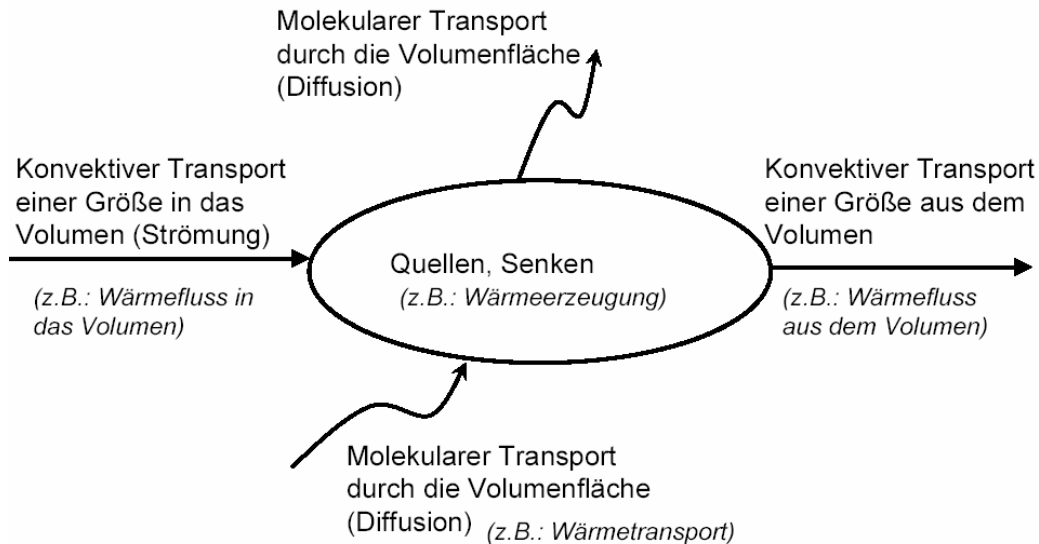


Abbildung 2-1: Bilanzierung einer physikalischen Größe [1]

Damit ist es auch möglich, eine allgemeine Erhaltungsgleichung, die als Grundgerüst für die oben erwähnten Bilanzgleichungen dient, zu formulieren. In differentieller Form und unter Anwendung der Tensorschreibweise, sieht diese folgendermaßen aus:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1)$$

Instationärterm Konvektion Diffusion Quellterm

- ϕ allgemeine spezifische, also auf die Masse bezogene, Größe
- t Zeit
- ρ Dichte
- u_i Geschwindigkeitskomponente in Richtung i
- x_i Wegkomponente in Richtung i
- Γ allgemeiner Diffusionskoeffizient
- S Quelle bzw. Senke

Der Instationärterm beschreibt die zeitliche Änderung des Produktes $\rho \cdot \phi$ im Inneren eines Kontrollvolumens. Die Ursachen für eine solche Änderung sind einerseits über die Grenzen des Kontrollvolumens stattfindende Transportvorgänge, die konvektiver oder diffusiver Natur

sein können und über entsprechend bezeichnete Terme Niederschlag in der allgemeinen Erhaltungsgleichung finden. Andererseits erzeugt der Quellterm eine Änderung im Inneren des Betrachtungsvolumens, die ohne Transportvorgänge auskommt.

Aus dieser allgemeinen Form werden im Folgenden die Bilanzgleichungen für Masse, Impuls, Energie sowie ein Skalar abgeleitet. Dazu wird ϕ durch geeignete Größen ersetzt. Selbstverständlich können auch einzelne Terme wegfallen.

2.1.1.1 Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) [1]

Setzt man ϕ gleich Eins und den Diffusions- sowie den Quellterm gleich Null, kommt man auf die bekannte Kontinuitätsgleichung in differentieller Form und Tensorschreibweise:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ zeitliche Änderung der Masse, bezogen auf das Kontrollvolumen

$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j}$ aus den Massenflüssen über die Oberflächen resultierende Massenänderung, bezogen auf das Kontrollvolumen

2.1.1.2 Impulserhaltung (Strömungsgleichung) [1]

Setzt man in der allgemeinen Erhaltungsgleichung für ϕ die Geschwindigkeit ein, ergeben sich die Impulsbilanzen in differentieller Form und Tensorschreibweise:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3)$$

$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}$ zeitliche Änderung des Impulses, bezogen auf das Kontrollvolumen

$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j}$ konvektive Impulsflüsse über die Oberflächen, bezogen auf das Kontrollvolumen

$-\frac{\partial p}{\partial x_i}$ Summe der Druckkräfte, bezogen auf das Kontrollvolumen

$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ Summe der viskosen Kräfte, bezogen auf das Kontrollvolumen

ρg_i Erdanziehungskraft, bezogen auf das Kontrollvolumen

Mit Hilfe des Stokes'schen Gesetzes für Newton'sche Fluide können die Schubspannungen folgendermaßen formuliert werden:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

Setzt man diesen Zusammenhang in die obigen Impulserhaltungsgleichungen ein, ergeben sich die bekannten Navier-Stokes'schen Gleichungen in Tensorschreibweise:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (5)$$

2.1.1.3 Erhaltung einer skalaren Größe [1]

Betrachtet man die Größe ϕ der allgemeinen Erhaltungsgleichung als Skalar, welcher beispielsweise die Temperatur, die Energie, die turbulente kinetische Energie aber auch eine Konzentration sein kann und berücksichtigt zur Formulierung des diffusiven Transportes das Fick'sche Gesetz in Tensorschreibweise:

$$J_{\phi j} = -\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (6)$$

ergibt sich folgende Bilanzgleichung für eine skalare Größe in Tensorschreibweise:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \rho S_{\phi} \quad (7)$$

2.1.1.4 Energieerhaltung [1]

Setzt man in der allgemeinen Erhaltungsgleichung für die Größe ϕ die spezifische Enthalpie h ein, gelangt man unter Annahme einer konstanten Dichte und der Vernachlässigung der Dissipation auf folgende, differentielle Form der Energieerhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_i h}{\partial x_i} = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \right] \cdot \frac{1}{\rho} \quad (8)$$

T Temperatur

k Wärmeleitfähigkeit

S_h Wärmequelle, bezogen auf das Kontrollvolumen

Geht man von idealen Gasen und kleinen Druckänderungen aus, gilt folgende Beziehung:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (9)$$

c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

Eingesetzt in die obige Energieerhaltungsgleichung ergibt sich:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{S_h}{c_p} \right] \cdot \frac{1}{\rho} \quad (10)$$

2.1.2 Berücksichtigung der Turbulenz

Aus den in weiterer Folge erläuterten Gründen, sind für die praxisrelevante Berücksichtigung der Turbulenz, zusätzlich zu den Erhaltungsgleichungen, noch weitere Ansätze erforderlich. Da der Ladungswechsel in Verbrennungskraftmaschinen, mit dessen numerischer Abbildung sich die vorliegende Diplomarbeit befasst, von hochturbulenten Strömungseffekten geprägt ist, ist diesen Ansätzen hier besondere Bedeutung beizumessen. Diesem Umstand soll durch die folgenden grundlegenden Erklärungen Rechnung getragen werden.

Mit den in Kapitel 2.1.1 dargestellten Erhaltungsgleichungen (Kontinuitätsgleichung, Navier-Stokes Gleichungen, Energieerhaltungsgleichung) und einer, vom Medium abhängigen, Zustandsgleichung ergibt sich für den räumlichen Fall ein System von sechs Gleichungen, dem sechs Unbekannte, nämlich die Geschwindigkeitskomponenten, Druck, Dichte und Temperatur, gegenüberstehen. Genauer gesagt handelt es sich dabei um ein System von gekoppelten, nicht-linearen, partiellen Differentialgleichungen 2.Ordnung, welches im Allgemeinen nur mit Hilfe numerischer Methoden gelöst werden kann. Grundsätzlich besitzt dieses Gleichungssystem sowohl für laminare als auch für turbulente Strömungen Gültigkeit. Im Falle der turbulenten Strömung muss allerdings die Auflösung aller Wirbel vorausgesetzt werden. Eine solche Vorgehensweise, die als „Direkte Numerische Simulation“ bezeichnet wird, hat auf Grund des damit einhergehenden, sehr großen Rechenaufwandes zurzeit keine praktische Bedeutung. Die aktuell technisch wichtigste Alternative soll im folgenden Unterkapitel kurz vorgestellt werden. [1]

2.1.2.1 Statistische Behandlung der Turbulenz [1]

Bei diesem, auch unter dem Namen Reynolds-Mittelung bzw. RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation) bekannten, Ansatz werden, entsprechend Abbildung 2-2, alle turbulent schwankenden Größen u mit Hilfe eines zeitlichen Mittelwertes \bar{u} und einer Schwankungsbewegung u' beschrieben.

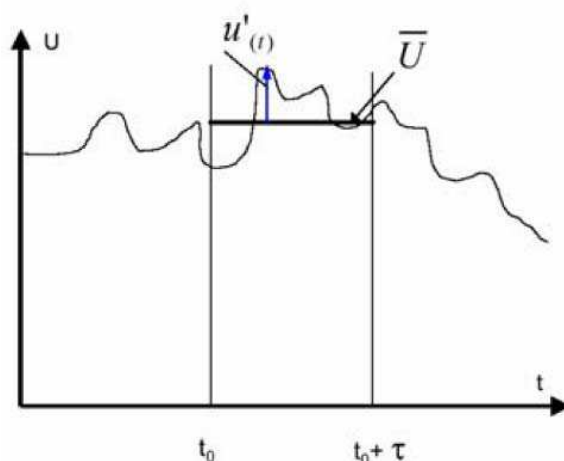


Abbildung 2-2: Reynolds-Mittelung [1]

Damit gilt für die Geschwindigkeit und den Druck:

$$u = \bar{u} + u' \quad p = \bar{p} + p' \tag{11}$$

Setzt man die in (11) vorgeschlagene Formulierung für die Geschwindigkeit in (2) ein, ergibt sich, unter Annahme einer konstanten Dichte, die zeitgemittelte Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{12}$$

Für die Impulserhaltungsgleichungen ergeben sich unter Berücksichtigung der Reynolds-Mittelung:

$$\frac{\partial \rho (\overline{u_i + u_i'})}{\partial t} + \frac{\partial \rho (\overline{u_i + u_i'}) (\overline{u_j + u_j'})}{\partial x_j} = - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{13}$$

wobei, im Falle Newton'scher Fluide für die Schubspannungen

$$\bar{\tau}_{ij} = +\mu \cdot \left(\frac{\partial (\overline{u_i + u_i'})}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{u_j + u_j'})}{\partial x_i} \right) = +\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \tag{14}$$

geschrieben werden kann. Durch Umformen des Konvektionsterms der Impulserhaltungsgleichung, entsteht ein Term, in dem die Korrelationen der Schwankungsbewegungen der Geschwindigkeiten erhalten bleiben. Bringt man diesen Term auf die rechte Seite und betrachtet ihn als zusätzliche Schubspannung ergeben sich die Reynoldsgleichungen (15), die formal den in (5) dargestellten Bilanzgleichungen entsprechen, jedoch nun mit zeitgemittelten Variablen. Die in (15) gelb hervorgehobenen Terme werden als Reynoldsspannungen bezeichnet. Deren Ursache liegt in den turbulenten Zusatzbewegungen des Fluids, die zu einem erhöhten Impulsaustausch führen, welcher näherungsweise wie eine erhöhte Zähigkeit wirkt.

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] + \rho g_i \tag{15}$$

Die Korrelationsterme stellen damit neue Unbekannte dar, weshalb weitere Informationen erforderlich sind, um das Gleichungssystem zu schließen. Dazu dienen aus Experimenten abgeleitete Ansätze. Der für technische Anwendungen am häufigsten verwendete Ansatz ist jener der Wirbelviskositätsmodelle, die durch den Grundgedanken, die Reynoldsspannungen wie eine erhöhte laminare Viskosität zu behandeln, gekennzeichnet sind.

Dazu wird die turbulente Viskosität μ_t , die im Gegensatz zur laminaren Viskosität μ_l keine Stoffgröße ist, eingeführt. Sie steht, wie folgt, mit den Korrelationstermen in Verbindung:

$$\tau_i = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{16}$$

k kinetische Energie der turbulenten Schwankungsbewegung

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \tag{17}$$

δ_{ij} Kronecker Delta

Fasst man die laminare und die turbulente zu einer effektiven Viskosität zusammen

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t \tag{18}$$

kann die Reynoldsgleichung mit dem Wirbelviskositätsansatz folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] + \rho g_i \tag{19}$$

Darin steckt implizit noch die Unbekannte μ_t , deren Ermittlung eine weitere Aufgabe des Wirbelviskositäts-Turbulenzmodells ist. Hinsichtlich der Berechnung von μ_t wird zwischen Modellen ohne, mit einer bzw. mit zwei Erhaltungsgleichungen unterschieden. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete k- ϵ -Modell gehört zur letztgenannten Gruppe. Für genauere Informationen dazu sei auf [1] verwiesen.

3 Softwarespezifische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die, für die vorliegende Arbeit, essentiellsten Grundlagen zur 0D/1D-Motorprozessrechnung mit AVL Boost erläutert werden. Des Weiteren wird versucht, die wichtigsten Informationen zur gekoppelten 1D/3D-Motorprozessrechnung zusammenzufassen, was vor allem dem besseren Verständnis von Kapitel 4 dienen soll.

3.1 0D/1D-Motorprozessrechnung mit AVL Boost

AVL Boost ist ein weit verbreitetes Programmpaket zur Simulation des gesamten Arbeitsprozesses von Verbrennungskraftmaschinen, welches sich der Mittel der 0D/1D-CFD-Simulation bedient. Damit ist es grundsätzlich möglich, die für den Ladungswechsel entscheidende, eindimensionale Gasdynamik im Ansaug- bzw. Abgastrakt zu berücksichtigen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Hockdruckphase, die nicht im direkten Fokus dieser Arbeit liegt, nulldimensional also ohne räumliche Auflösung abgebildet wird. Die Modellierung der Verbrennung erfolgt über Brennverläufe, die durch die Eingabe entsprechender Parameter gestaltet werden können.

Was die Vorgehensweise betrifft, wird zunächst mit Hilfe der im Pre-Processor vordefinierten Komponenten wie Luftfilter, Rohrverzweigungen, Zylinder oder Katalysatoren ein Motormodell aufgebaut und entsprechend parametrisiert. Im Anschluss daran kann die Simulation gestartet werden. Im Zuge dessen versucht der Solver, unter Anwendung eines expliziten Zeitschemas, das durch das erstellte Motormodell indirekt vorgegebene Gleichungssystem mit seinen Randbedingungen zu lösen. Die daraus resultierenden Ergebnisse können mit dem für das Post-Processing angebotenen Programm Impress Chart, sowohl zyklusgemittelt als auch zyklusaufgelöst, ausgewertet werden.

3.1.1 0D/1D-Komponenten

In den nachfolgenden Unterkapiteln sollen einige zur 0D/1D-Abbildung des Motorprozesses verwendete Elemente vorgestellt werden. Um den Rahmen nicht zu sprengen, wird die Auswahl bewusst auf jene Komponenten beschränkt, die grundlegende Bedeutung für die vorliegende Arbeit haben. Dies sind neben der Internal- und der System-Boundary, welche zur Aufbringung der Randbedingungen dienen, vor allem die Elemente, die für die Abbildung des Ansaugtraktes in Frage kommen. Um Unklarheiten vorzubeugen, werden die vorgestellten Komponenten mit ihren englischen Originalbezeichnungen benannt.

3.1.1.1 Pipe

Die für die Abbildung von Rohrleitungen zur Verfügung stehenden Pipes sind die für die Beschreibung des Ladungswechsels wohl elementarsten Komponenten. Was die Geometrie betrifft, können über die vorgegebene Länge beliebig variierende Querschnittsverläufe definiert werden. Nicht kreisrunde Querschnittsflächen können durch die Eingabe des hydraulischen Durchmessers berücksichtigt werden. Selbstverständlich können auch Biegeradien der Rohre, die zu entsprechenden Druckverlusten führen, eingegeben werden.

Die Rohrreibung wird dabei über die folgende Beziehung berücksichtigt [3]:

$$\frac{F_R}{V} = \varphi \cdot \frac{\lambda_f}{2 \cdot d_{hyd}} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| \quad (20)$$

- $\frac{F_R}{V}$ Rohrreibungskraft, bezogen auf das Rohrvolumen
 φ Fanning-Faktor, berücksichtigt den Einfluss nicht kreisrunder Querschnitte
 λ_f Rohrreibungsfaktor
 d_{hyd} hydraulischer Rohrdurchmesser
 ρ Dichte
 u Geschwindigkeit

Der Rohrreibungsfaktor λ_f hängt neben der Reynoldszahl auch von der Wandrauigkeit und dem Rohrdurchmesser ab. Für vollständig turbulente Strömungen kann er, in Abhängigkeit der beiden letztgenannten Parameter, Tabellen entnommen werden.

Weiters kann zwischen unterschiedlichen Ansätzen für die Berechnung der Nusselt-Zahl, die entscheidenden Einfluss auf den Wärmeübergang hat, gewählt werden. Die Wandtemperatur kann variabel über die Rohrlänge vorgegeben werden. Diese Eingabeoptionen sind vor allem für die Abbildung des Abgastraktes interessant.

Was die numerische Berechnung angeht, kann entweder die Zellenanzahl oder die Zeitschrittweite angegeben werden. Die jeweils andere Größe wird unter Berücksichtigung des CFL (Courant, Friedrichs und Lewy)-Kriteriums berechnet [3]:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u + a} \quad (21)$$

- Δt Zeitschrittweite
 Δx Zellgröße
 u Strömungsgeschwindigkeit
 a Schallgeschwindigkeit

3.1.1.2 System Boundary (SB)

Diese Elemente werden üblicherweise verwendet, um Randbedingungen eines Motormodells zu definieren, wozu sie sowohl am ersten Rohr des Ansaugtraktes als auch am letzten Rohr des Auspuffsystems positioniert werden. Vorgegeben werden dazu neben dem Umgebungsdruck und der Umgebungstemperatur auch Durchflusskoeffizienten für den Ein- bzw. den Ausströmvorgang. Mit diesen Informationen und der im Folgenden dargestellten Durchflussgleichung kann der Massenstrom an den Rändern berechnet werden [4]:

$$\dot{m} = A \cdot \alpha \cdot p_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_0}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \quad (22)$$

A	Querschnittsfläche
α	Durchflusskoeffizient
p_0	stromaufwärts wirksamer Totaldruck
T_0	stromaufwärts wirksame Temperatur
p	stromabwärts wirksamer, statischer Druck
R	spezifische Gaskonstante
κ	Isentropenexponent

Der vorgegebene Umgebungsdruck entspricht damit, im Falle von $\alpha=1$, dem am Rohrende wirksamen Totaldruck beim Einströmen bzw. dem dort wirkenden statischen Druck beim Ausströmen.

Die in diesem Zusammenhang wichtige Frage, ob es zu einem Ein- oder Ausströmvorgang kommt, wird mit Hilfe des Druckes, welcher sich bei einem geschlossenen Rohrende ergeben würde, beantwortet. Liegt dieser Druck über dem Umgebungsdruck, tritt das Medium aus dem Rohr in die Umgebung aus, liegt er darunter strömt das Medium aus der Umgebung in das Rohr.

3.1.1.3 Internal Boundary (IB)

Die Internal Boundary stellt neben der System Boundary die zweite Möglichkeit dar, die AVL Boost zum Aufprägen von Randbedingungen anbietet. Es werden hier ebenfalls, jeweils ein Druck und eine Temperatur vorgegeben. Diese beziehen sich nun allerdings nicht auf die Umgebung sondern auf den Querschnitt am Ende des Rohres. Damit ist am Rohrende, unabhängig davon, ob das Medium ein- oder ausströmt, ständig der vorgegebene Druck als statischer Druck wirksam.

Gedacht ist diese Variante vor allem für Sub-Modelle, die nur einen Teil des Motors abbilden und an deren künstlichen Rändern Druck und Temperatur aus Messungen bzw. anderen Rechnungen bekannt sind.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es weder mit der System Boundary noch mit der Internal Boundary möglich ist, Massenströme bzw. Normalgeschwindigkeiten an den Rändern aufzuprägen. Auch die Vorgabe eines Totaldruckes ist nur im Falle von nicht wechselnden Strömungsrichtungen am betreffenden Rohrende möglich. Diese Tatsache stellt vor allem bei Sub-Modellen, wie in Kapitel 5 zu sehen sein wird, beträchtliche Einschränkungen dar.

3.1.1.4 Plenum

Beim Plenum handelt es sich um ein, häufig auch im Ansaugtrakt zur Abbildung größerer Volumina verwendetes, nulldimensionales Element. Auf Grund der fehlenden räumlichen Auflösung sind nicht nur sämtliche Variablen, wie Druck und Temperatur, zu einem bestimmten Zeitpunkt im gesamten Plenum konstant, sondern es können auch keine Strömungen im Inneren desselben erfasst werden, was einem verschwindenden Impuls gleichkommt. Damit wird die gesamte kinetische Energie des einströmenden Mediums dissipiert. Am besten kann man sich dieses Verhalten anhand eines einfachen, in Abbildung 3-1 dargestellten, Beispiels vorstellen. Dabei wird ein zwischen zwei Rohren liegendes als

Plenum abgebildetes Volumen unter stationären Randbedingungen von Luft durchströmt. Was die Eingabeparameter des Plenums betrifft, sind neben der Angabe der Abmessungen auch die Durchflusskoeffizienten für alle angeschlossenen Rohre festzulegen. Für das nachfolgende Beispiel weisen diese Koeffizienten allesamt den Wert eins auf.

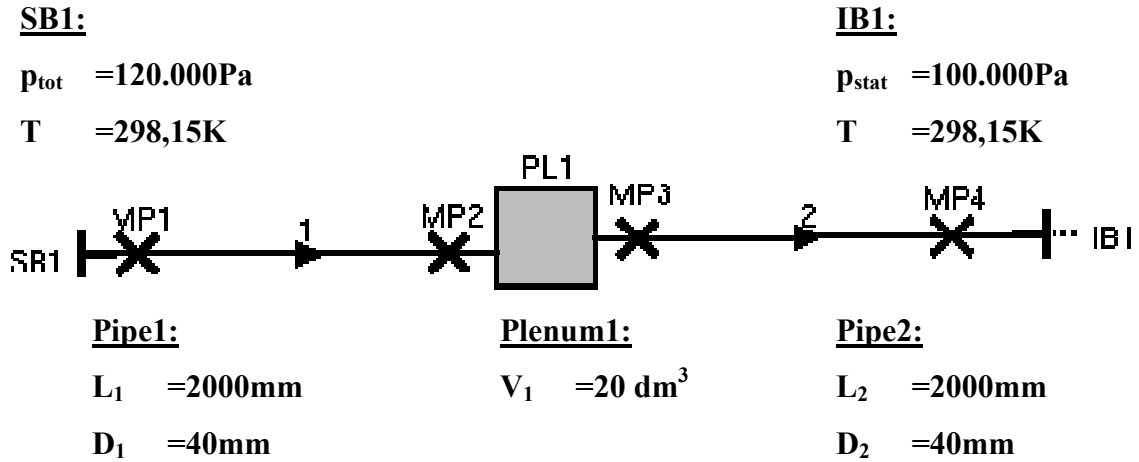


Abbildung 3-1: Stationär durchströmtes Plenum

Die in den am Anfang und am Ende der Rohre positionierten Messpunkte sowie die im Plenum ausgewerteten Ergebnisse können Tabelle 3-1 entnommen werden.

		MP1	MP2	Plenum	MP3	MP4
Statischer Druck	[Pa]	115.386	110.531	110.502	105.429	100.000
Totaldruck	[Pa]	120.000	115.371	110.502	110.502	105.367
Geschwindigkeit	[m/s]	81,7	85,6	0	89,6	94,7
Temperatur	[K]	294,8	295,8	299,5	295,5	296,1

Tabelle 3-1: Ergebnisse für das stationär durchströmte Plenum

Wie zu sehen ist, tritt über das Plenum ein Totaldruckverlust auf, welcher der Differenz aus Totaldruck und statischem Druck, also dem dynamischen Druck, vor dem Plenum entspricht. Damit ist auch klar ersichtlich, weshalb Behälter deren Abmessungen im Vergleich zu den angeschlossenen Rohren groß sind (was auch in der Realität zur Dissipation des Großteils der eingebrachten kinetischen Energie führt) im Allgemeinen durch ein Plenum gut abgebildet werden können. Für die Modellierung kleiner Behälter, in denen nicht zu vernachlässigende Werte der Strömungsgeschwindigkeiten und damit auch des Impulses auftreten, ist die Verwendung der Komponente Plenum hingegen problematisch.

Ein weiteres Problem, dessen Auswirkungen vor allem bei der Abbildung langgezogener Volumina merkbar werden, stellen die auf Grund der Nulldimensionalität falsch abgebildeten, zurückzulegenden Wege der Druckwellen dar.

3.1.1.5 Junction

Mit Hilfe einer Junction können Rohrverzweigungen abgebildet werden. Man kann dabei zwischen drei unterschiedlichen Modellen wählen:

(a) Constant Pressure Model

Bei der Verwendung dieses Modells sind für alle an die Rohrverzweigung angeschlossenen Pipes, sowohl für den Ein- als auch für den Ausströmvorgang, Durchflusskoeffizienten anzugeben. Diese können entweder konstante Werte oder Funktionen der Zeit bzw. des Kurbelwinkels sein. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Constant-Pressure-Junction dasselbe Verhalten wie ein Plenum mit denselben Durchflusskoeffizienten und verschwindendem Volumen aufweist.

(b) Constant Static Pressure Model

Dieses Modell stellt die einfachste Möglichkeit dar, eine Rohrverzweigung abzubilden. Dabei ist der statische Druck im Mündungsquerschnitt für alle angeschlossenen Rohre derselbe. Es stehen keinerlei Eingabeparameter zur Verfügung.

(c) Refined Model

Dieses Modell kann ausschließlich für die Zusammenführung von genau drei Pipes eingesetzt werden und ist das einzige, welches die von den Rohren eingeschlossenen Winkel berücksichtigt. Abgesehen von diesen Winkeln sind keine weiteren Angaben erforderlich. Die berechneten Massenströme basieren auf der Lösung der Durchflussgleichung. Nachdem es, wie in Abbildung 3-2 zu sehen, sowohl drei verschiedene Trennungs- als auch Vereinigungsfälle gibt, bei denen jeweils zwei Strömungspfade betrachtet werden, arbeitet dieses Modell mit sechs Durchflusskoeffizienten. Abbildung 3-3 zeigt den qualitativen Verlauf dieser Koeffizienten am Beispiel eines Vereinigungsfalles. Die Werte für diese Größen werden von AVL Boost, in Abhängigkeit der eingegebenen Winkel und Rohrquerschnitte, durch Interpolation aus einer, dem Modell hinterlegten, Tabelle ermittelt.

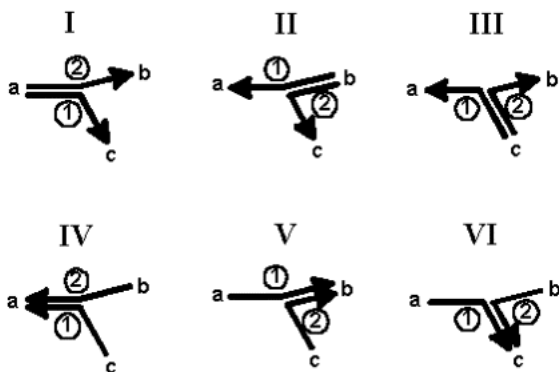


Abbildung 3-2: Trennungs- und Vereinigungsfälle des Refined Models [3]

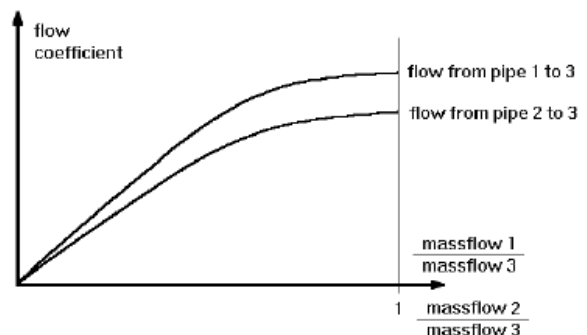


Abbildung 3-3: Durchflusskoeffizienten des Refined Models [4]

3.2 Grundlagen der gekoppelten 1D/3D-CFD-Simulation

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, kann mit Hilfe der 0D/1D-Motorprozessrechnung der gesamte Arbeitsprozess einer Verbrennungskraftmaschine abgebildet werden. Die Betrachtung der Variablen, welche in den zur Beschreibung der Strömungsvorgänge herangezogenen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie auftreten, erfolgt dabei in Abhängigkeit der Zeit und maximal einer räumlichen Dimension. Für zahlreiche ausgeführte Motoren hat sich eine derartige Vorgehensweise, auf Grund einer zufriedenstellenden Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messdaten, bewährt. Im Falle von Motorkonzepten in deren Ansaug- bzw. Abgastrakt, hervorgerufen durch komplexe Geometrien, räumliche Strömungsphänomene auftreten, die prinzipbedingt mit den Mitteln der 0D/1D-CFD-Simulation nicht erfasst werden können, führt diese Methode allerdings häufig zu inakzeptablen Abweichungen von den realen Verhältnissen. In solchen Fällen stellt die gekoppelte 1D/3D-Motorprozessrechnung eine durchaus sinnvolle Alternative dar. Dabei erfolgt innerhalb dieser komplexen Geometrien eine räumlich aufgelöste Berechnung der Strömung, während alle anderen Bereiche weiterhin null- bzw. eindimensional behandelt werden. Im Folgenden sollen die wichtigsten Grundlagen zur gekoppelten 1D/3D Motorprozessrechnung mit AVL Boost (0D/1D) und AVL Fire (3D) erläutert werden.

Bei der Koppelung dieser beiden Programme ist Boost für die Berechnung der Variablen in den 0D/1D-Komponenten des Motormodells zuständig, während Fire die Erhaltungsgleichungen im 3D-Gebiet löst. Zur Interaktion kommt es durch den Austausch räumlich und zeitlich gemittelter, physikalischer Größen zu Beginn eines jeden Zeitschrittes. Dabei werden die vom jeweils anderen Programm erhaltenen Größen als Randbedingung für die eigene Rechnung verwendet. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Fire mit einer vollimpliziten Finite Volumen Methode arbeitet, während sich Boost einer expliziten Finite Differenzen Methode bedient. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass Fire dadurch mit größeren Zeitschritten arbeitet, als sie in Boost, auf Grund der Beschränkung durch das CFL-Kriterium (siehe (20), Kapitel 3.1.1.1), zulässig sind. Um eine instabile Rechnung zu vermeiden, teilt Boost den von Fire gewählten Zeitschritt in mehrere Zwischen-Zeitschritte auf. Die am Ende eines Zeitschrittes übergebenen Größen entsprechen dem Mittelwert über alle Zwischen-Zeitschritte. Grundsätzlich gibt es folgende drei Fälle, in denen Boost derartige Zwischenschritte einführt [2]:

- Die Fire-Zeitschrittweite ist größer, als die von Boost auf Basis des CFL-Kriteriums berechnete.
- Der größere der beiden eingegebenen Zeitschritte ist kein ganzzahliges Vielfaches des kleineren.
- Die kumulierten Zeitschritte passen nicht exakt mit charakteristischen Werten, wie OT oder UT, zusammen.

3.2.1 Fire-Boost-Interaktion [2]

Für den bereits erwähnten Datenaustausch zwischen Boost und Fire müssen, wie in Abbildung 3-4 zu sehen, im 3D-Gebiet zusätzliche, auch als Integrationsvolumina bezeichnete, über die eigentliche Geometrie hinausragende Zellschichten aufgebracht werden.

Die aus demselben Grund erforderliche, zusätzliche Zelle im 0D/1D-Abschnitt wird hingegen von Boost selbstständig erzeugt. Dazu werden die, an das 3D-Gebiet angrenzenden, Enden der betreffenden Rohre im 0D/1D-Teilmodell mit so genannten Fluid Links gekennzeichnet.

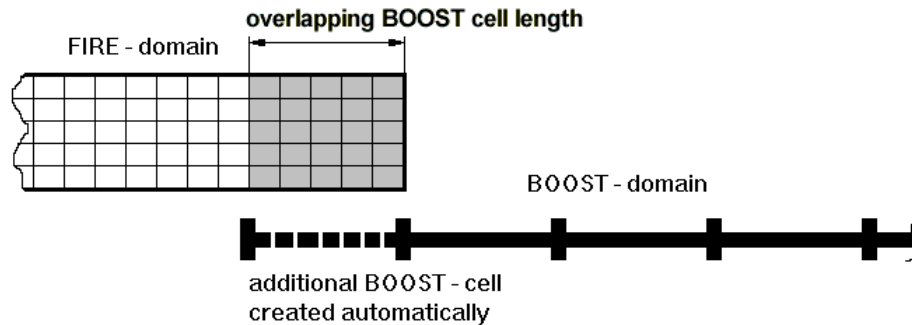


Abbildung 3-4: Definition der Integrationsvolumina [2]

Zu Beginn eines jeden Zeitschrittes werden Dichte, Impuls und innere Energie, entsprechend Abbildung 3-5, über die Integrationsvolumina des 3D-Gebietes gemittelt und an Boost übergeben. In der 0D/1D-Rechnung werden diese Werte für die Initialisierung der vorhin erwähnten, zusätzlich aufgebrauchten Zelle verwendet.

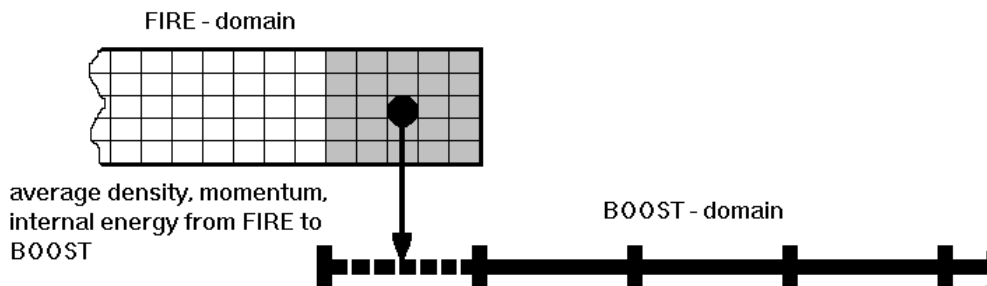


Abbildung 3-5: Datentransfer von 3D zu 1D [2]

Unter Berücksichtigung dieser von Fire erhaltenen Größen kann Boost die Berechnung des nächsten Zeitschrittes, der wie vorhin erwähnt möglicherweise aus mehreren Teilzeitschritten zusammengesetzt ist, durchführen. Die daraus resultierenden Flüsse an Masse, Impuls und Energie werden, wie in Abbildung 3-6 ersichtlich, an Fire übergeben und im 3D-Gebiet als Randbedingung verwendet.

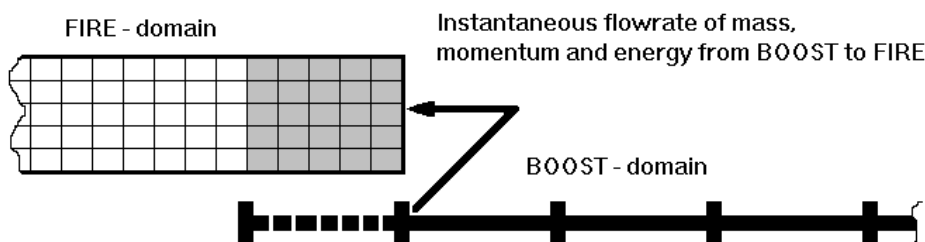


Abbildung 3-6: Datentransfer von 1D zu 3D [2]

Was die Positionierung der Koppelstellen betrifft, sind unbedingt Rohrabschnitte zu wählen, in denen ein möglichst ideal eindimensionales Strömungsfeld zu erwarten ist. Treten über Teilbereiche des Querschnittes, wie in Abbildung 3-7 dargestellt, Rückströmungen auf, handelt es sich dabei natürlich um keinen eindimensionalen Strömungszustand. Die Koppelstelle ist daher, wie angedeutet, weiter Richtung 0D/1D-Domäne zu verschieben.

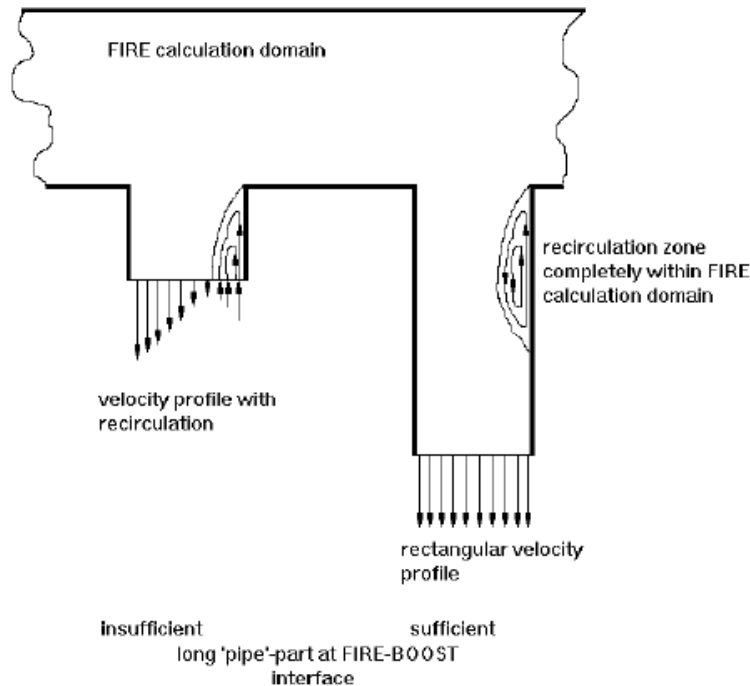


Abbildung 3-7: Einfluss der Koppelstellenposition [2]

Um die Rechenzeit für die gekoppelte Simulation zu minimieren, ist ein möglichst gut initialisiertes 0D/1D-Modell anzustreben. Dem wird durch sogenannte Boost-only-Zyklen Rechnung getragen. Dabei handelt es sich um eine klassische 0D/1D-Motorprozessrechnung, die vor dem Start der gekoppelten Zyklen durchgeführt wird. Der Bereich zwischen den Fluid Links, der im Rahmen der gekoppelten Simulation durch das 3D-Modell abgebildet wird, muss dazu, wie in Abbildung 3-8 zu sehen, mit Hilfe eines 0D/1D-Modells, dem sogenannten Shadow-Netzwerk, geschlossen werden. Dieses sollte, im Sinne einer guten Initialisierung, eine möglichst gute Nachbildung des 3D-Modells darstellen.

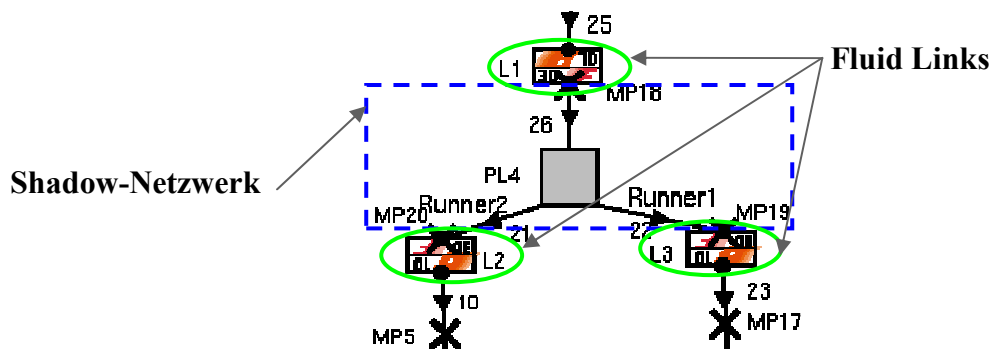


Abbildung 3-8: Shadow-Netzwerk mit Fluid Links

4 Rotax 804 mit Zweivolumenansaugtrakt

Am Ausgangspunkt dieser Arbeit bestand zwar, aus den in Kapitel 1.2 angeführten Gründen, der Wunsch nach einer Methode zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit von komplexen Geometrien des Luftpfades, jedoch waren keinerlei konkrete Ideen, wie eine solche Methode aussehen könnte, vorhanden. Daher wurde zunächst versucht im Zuge einer Analyse herauszufinden, welche Strömungsphänomene in komplex geformten Ansaugluftverteilern auftreten bzw. welche davon maßgeblichen Einfluss auf den Liefergrad haben und damit von besonderem Interesse sind. Wie aus [13] bekannt, unterscheiden sich die bei der stationären Durchströmung komplex geformter Geometrien auftretenden Strömungseffekte zum Teil deutlich von jenen, die unter motorischen Randbedingungen auftreten. Infolgedessen erschien es sinnvoll, für die erwähnte Analyse, die Ergebnisse einer gekoppelten 1D/3D-CFD-Simulation heranzuziehen. Die Wahl fiel dabei auf die, in Kapitel 1.1 beschriebene, 804-Zweivolumenvariante, da für dieses Motorkonzept, neben den Ergebnissen einer konventionellen 0D/1D-Motorprozessrechnung, auch solche zweier gekoppelter 1D/3D-Motormodelle vorhanden waren. Aus den in den nachfolgenden Unterkapiteln ersichtlich werdenden Gründen ergab sich die Erfordernis einer sehr detaillierten Untersuchung dieser gekoppelten Modelle, weshalb diesem Motor bzw. weit mehr den dazugehörigen Simulationsmodellen ein ganzes Kapitel dieser Arbeit gewidmet wurde.

4.1 Analyse der vorhandenen Daten

Die in Abbildung 4-1 ersichtlichen Verläufe des, über die Drehzahl aufgetragenen, indizierten Mitteldruckes können als Zusammenfassung der zu Beginn dieser Arbeit vorhandenen Informationen verstanden werden. Neben dem am Motorprüfstand ermittelten Verlauf sind die Ergebnisse zweier gekoppelter 1D/3D-Motormodelle sowie das Resultat der 0D/1D-Motorprozessrechnung dargestellt. Bei allen in Abbildung 4-1 dargestellten Kurven handelt es sich, wie auch bei allen weiteren auf den Motorprozess bezogenen Ergebnissen, um Volllastbetrachtungen, weshalb im Folgenden die Kennzeichnung von Betriebspunkten alleine durch die Angabe der Drehzahl erfolgt.

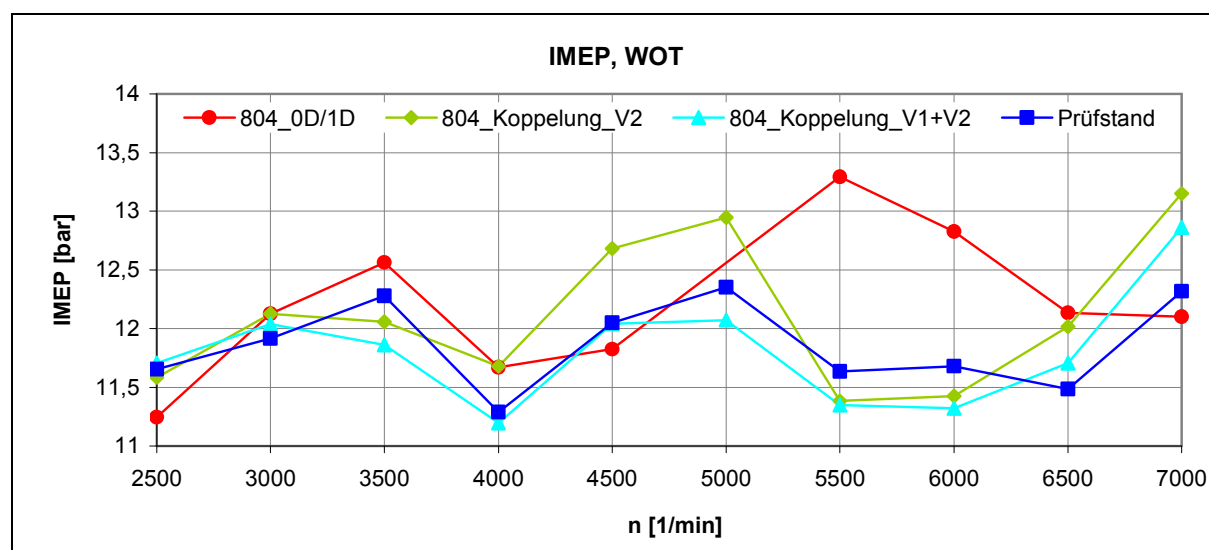


Abbildung 4-1: Indizierte Volllast-Mitteldrücke über Drehzahl, Ausgangsdaten

Die beiden gekoppelten Motormodelle unterscheiden sich, wie in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 zu sehen, lediglich durch die Ausdehnung des 3D-Rechengebietes und die dadurch bedingte, unterschiedliche Lage der Koppelstellen.

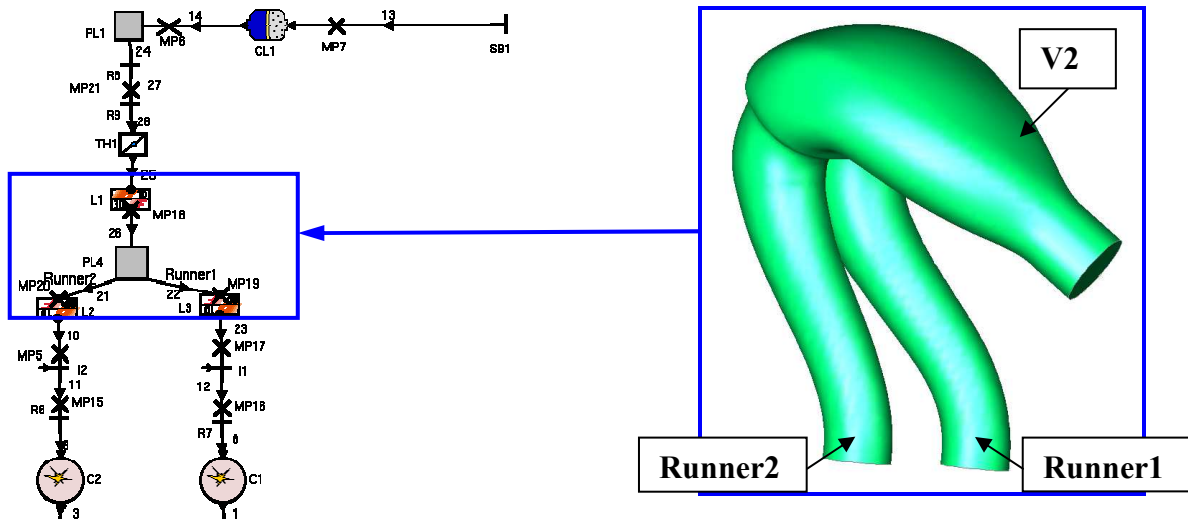


Abbildung 4-2: 0D/1D-Shadow-Modell und 3D-Domäne des Modells 804_Koppelung_V2 [13]

Während im Falle des Modells Koppelung_804_V2 nur das Sekundärvolumen (V2) samt den Runnern dreidimensional abgebildet wird, erfolgt dies im Modell 804_Koppelung_V1+V2 zusätzlich auch für das Primärvolumen inklusive Ansaugtrichter und Resonanzvolumen sowie für das, zwischen Primär- und Sekundärvolumen liegende, Verbindungsrohr, welches auch die Drosselklappe beinhaltet.

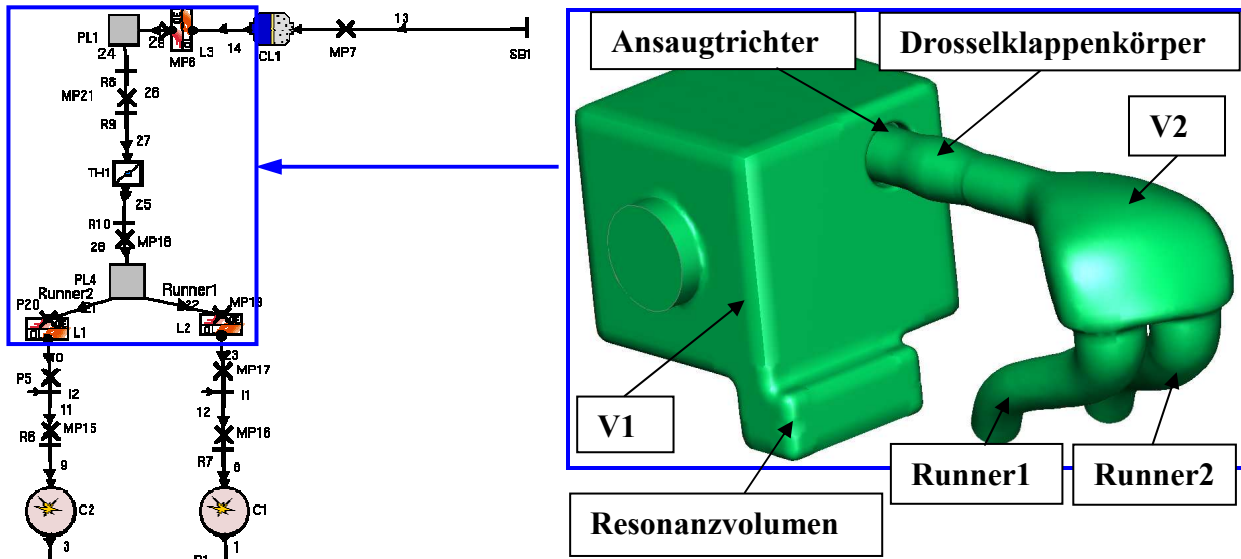


Abbildung 4-3: 0D/1D-Shadow-Modell und 3D-Domäne des Modells 804_Koppelung_V1+V2 [13]

4.1.1 Analyse der räumlichen Verteilung der Strömungsgrößen

Auf Grund der bereits erwähnten Motivation, die dreidimensionalen Strömungsphänomene, welche als verantwortlich für die großen Abweichungen zwischen dem 0D/1D- und den gekoppelten 1D/3D-Motormodellen gelten, zu erfassen, wurden mit Hilfe von Schnitten durch die 3D-Rechengebiete sämtliche Strömungsgrößen analysiert. Stellvertretend dafür sind in Abbildung 4-4 bis Abbildung 4-6 die Verteilung des statischen Druckes, die Stromlinien, sowie die Geschwindigkeitsvektoren für die Drehzahl 5500 1/min, zum Zeitpunkt 90° KW nach dem Ladungswechsel-OT von Zylinder1, dargestellt. Links bzw. oben sind jeweils die Schnitte durch das 3D-Gebiet des Modells 804_Koppelung_V1+V2 zu sehen, rechts bzw. unten jene des Modells 804_Koppelung_V2. Die Analyse der 3D-Daten zusammenfassend kann festgehalten werden, dass vor allem im Sekundär- aber auch im Primärvolumen Wirbel auftreten, die mit Hilfe der 0D/1D-Abbildung nicht erfasst werden können und damit als Ursache für die in Abbildung 4-1 ersichtlichen Abweichungen in Frage kommen. Allerdings konnten zwischen Betriebspunkten mit relativ guter Übereinstimmung zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodellen (z. B.: 3000 1/min) und solchen mit einer schlechteren Übereinstimmung (z. B.: 5500 1/min) keine klar quantifizierbaren Unterschiede hinsichtlich dieser räumlichen Strömungseffekte festgestellt werden. Damit war es nicht möglich, das Auftreten bestimmter dreidimensionaler Vorgänge als besonders relevant für den Ladungswechsel zu beurteilen. Mit dieser Erkenntnis wurde die sehr zeitintensive, schlussendlich aber in kaum verwertbaren Ergebnissen resultierende Analyse der 3D-Daten abgeschlossen.

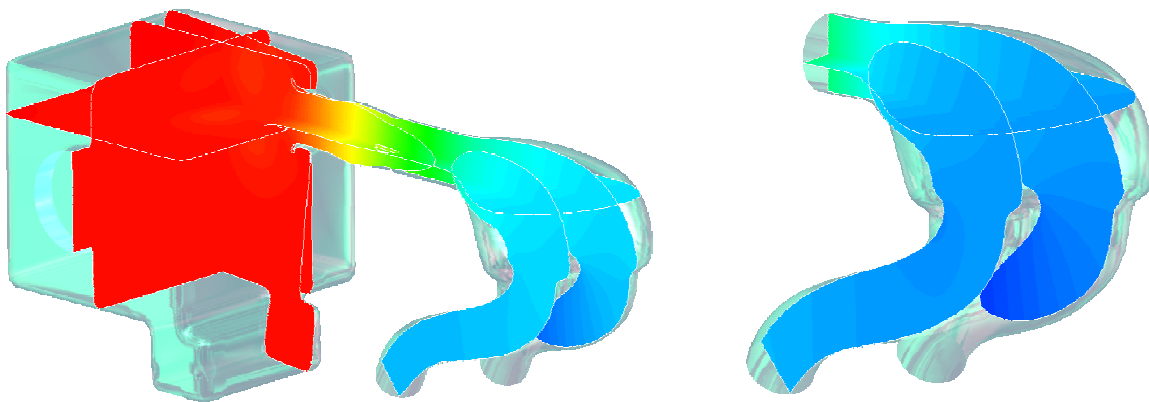


Abbildung 4-4: Statischer Druck in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle

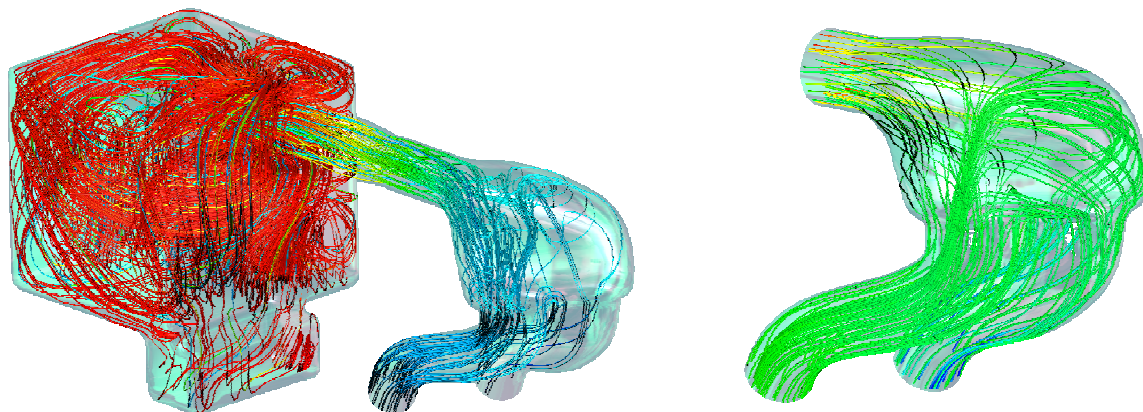


Abbildung 4-5: Stromlinien in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle

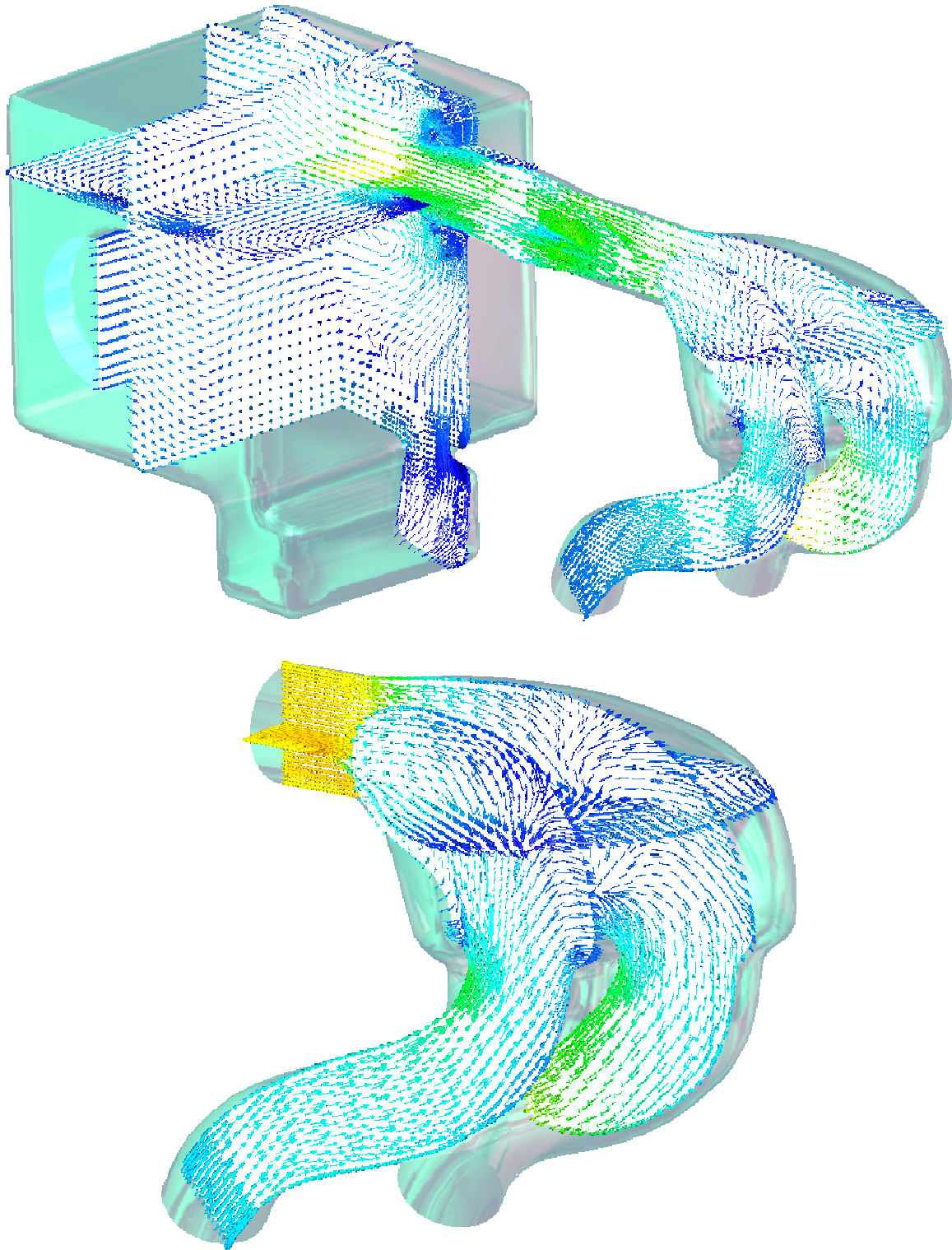


Abbildung 4-6: Geschwindigkeitsvektoren in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle

4.1.2 Analyse der zeitlichen Verläufe der Strömungsgrößen

Im Folgenden werden die Verläufe unterschiedlichster, strömungstechnisch relevanter Größen (Drücke, Temperaturen, Massenströme, ...) über die Zeit bzw. den Kurbelwinkel betrachtet. Diese Größen können einerseits an Messpunkten im 0D/1D-Modell und andererseits, über bestimmte Flächen- oder Zellektionen gemittelt, im 3D-Bereich eines gekoppelten Motormodells ausgewertet werden. Es handelt sich dabei also um Informationen, die deutlich ersichtliche Zusammenhänge mit der für den Motorprozess letztendlich entscheidenden Güte des Ladungswechsels zeigen, wengleich die räumliche Auflösung fehlt.

Im Zuge dieser Analyse wurden unzählige Verläufe entscheidend erscheinender Größen ausgewertet. Ein sehr kleiner Auszug, der daraus hervorgegangenen Diagramme, soll im Folgenden zum besseren Verständnis, der dabei gewonnenen Erkenntnisse, beitragen.

Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 zeigen die in Hinblick auf den Liefergrad aussagekräftigen Massenströme am Austritt des Runner1 bei 4500 bzw. 5500 1/min. Im Falle der gekoppelten 1D/3D-Motormodelle handelt es sich dabei gleichzeitig um den zwischen 0D/1D- und 3D-Domäne stattfindenden Massenaustausch. Durch die spezielle Auswahl der betrachteten Drehzahlen sollen die Zusammenhänge zu den in Abbildung 4-1 dargestellten Mitteldruck-Verläufen aufgezeigt werden. Die Wahl des Runner1 hat im Gegensatz dazu keine besondere Bedeutung. Die Massenströme am Austritt des Runner2 weisen eine ganz ähnliche, wengleich um 360 °KW phasenverschobene Charakteristik auf.

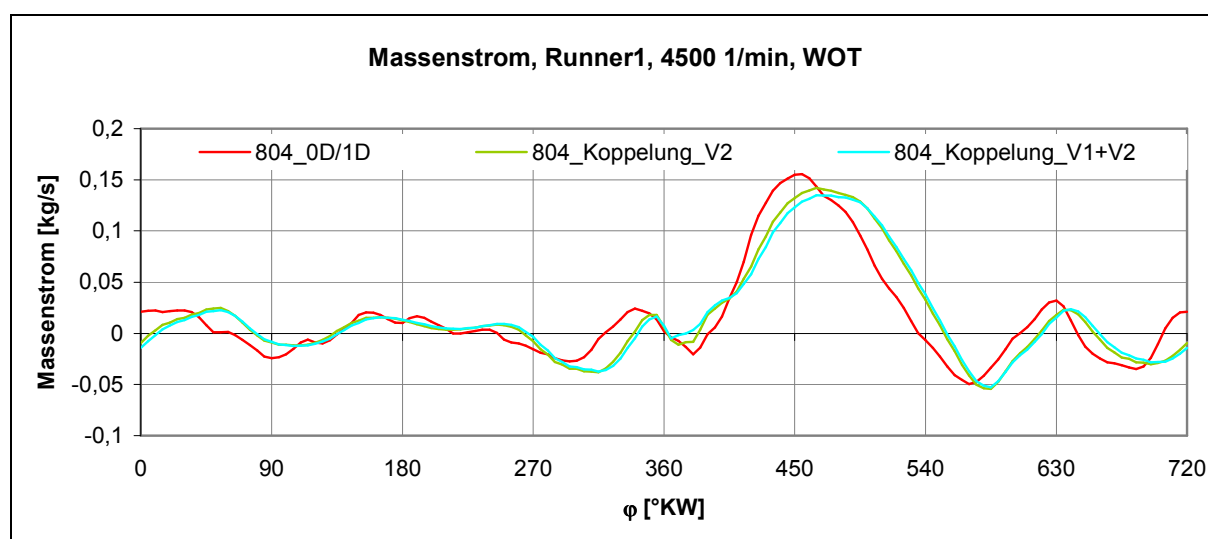


Abbildung 4-7: Massenstrom am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min

Bei der Betrachtung der oben genannten Verläufe fällt zunächst eine Übereinstimmung der gekoppelten Modelle hinsichtlich der Massenströme auf, die so bei den zugehörigen indizierten Mitteldrücken absolut nicht feststellbar ist. Dieser Diskrepanz soll im anschließenden Kapitel 4.1.3 auf den Grund gegangen werden. Vergleicht man die Massenstromverläufe des 0D/1D- mit denen der gekoppelten 1D/3D-Motormodelle, ist eine deutliche Abweichung zu erkennen, die bei 5500 1/min etwas größer als bei 4500 1/min ist. Dieses Verhalten deckt sich im Hinblick auf den IMEP recht gut mit den Abweichungen zwischen den Modellen 804_0D/1D und 804_Koppelung_V2. Die gute Übereinstimmung zwischen 804_0D/1D und 804_Koppelung_V1+V2, bezüglich der indizierten Mitteldrücke

bei 4500 1/min, kann allerdings aus den Massenstromverläufen nicht erkannt werden, was als weitere Motivation für die in Kapitel 4.1.3 durchgeführten Untersuchungen aufzufassen ist.

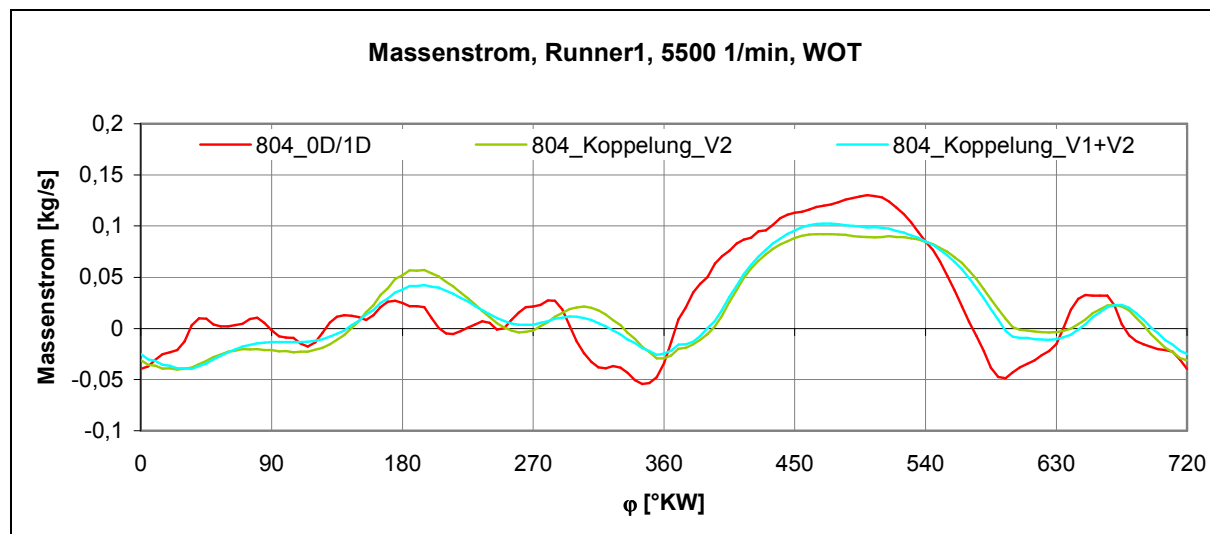


Abbildung 4-8: Massenstrom am Austritt des Runner1 bei 5500 1/min

Beschäftigt man sich mit den Ursachen für die Massenströme im Luftpfad von Verbrennungskraftmaschinen kommt man, vor allem im Bereich der freisaugenden Motoren, an gasdynamischen Betrachtungen nicht vorbei [1]. Dem wird durch die nachfolgende Analyse der vor- und zurücklaufenden Druckwellen Rechnung getragen.

Die dargestellten Verläufe beziehen sich, wie die oben betrachteten Massenströme, auf das Ende des Runner1. Auch die dafür herangezogenen Betriebspunkte bleiben dieselben. Anhand der in Abbildung 4-9 ersichtlichen zurücklaufenden Druckwellen bei 4500 1/min, kann mit dem Wissens über den, bei 360 °KW gelegenen, Ladungswechsel-OT von Zylinder1, auf Grund des etwa 90 °KW später auftretenden Minimums, die Identität des untersuchten Runners nachgewiesen werden.

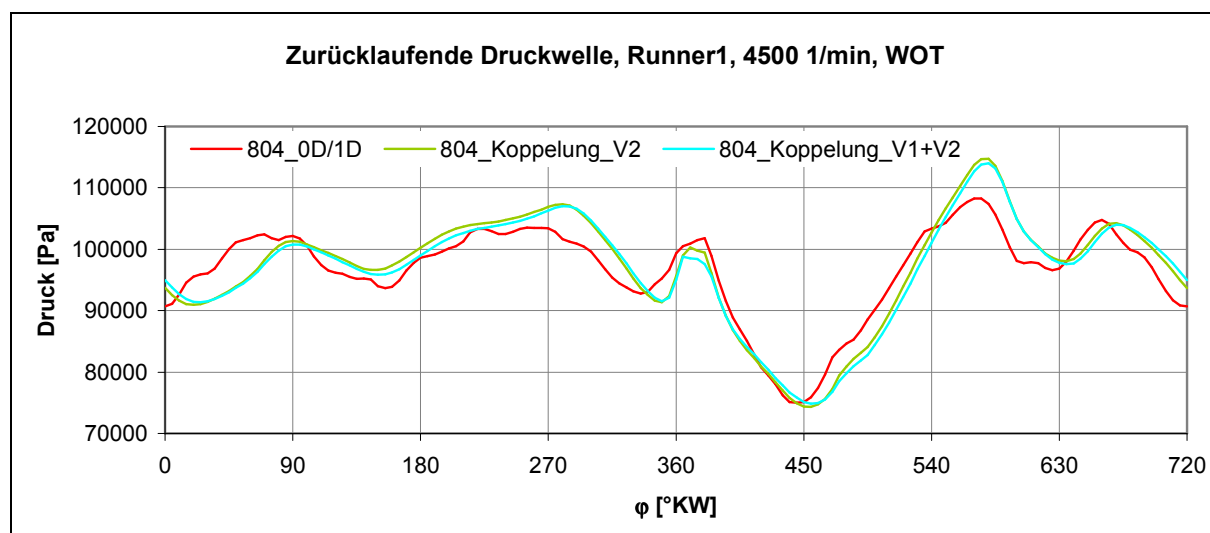


Abbildung 4-9: Zurücklaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min

Betrachtet man nun an derselben Stelle die vorlaufenden Druckwellen (Abbildung 4-10), kann ein Maximum erkannt werden, welches, abhängig vom jeweiligen Modell, mehr oder weniger

kurze Zeit nach dem Minimum der zurücklaufenden Druckwelle auftritt. Dies erklärt sich durch die Entstehung der vorlaufenden Druckwelle infolge einer Reflexion der zurücklaufenden am offenen Rohrende. Damit wird auch klar, warum die Kurve des 0D/1D-Motormodells in Abbildung 4-9 besser mit denen der gekoppelten 1D/3D-Motormodelle übereinstimmt, als dies in Abbildung 4-10 der Fall ist. Während der Weg der zurücklaufenden Druckwelle bis zum Erreichen der Auswertestelle am Runner1, im 0D/1D-Motormodell, lediglich durch 1D-Komponenten abgebildet wird, liegen am für die vorlaufende Druckwelle relevanten Weg mit dem Primär- und Sekundärvolumen zwei, im 0D/1D-Motormodell, als Plenum also nulldimensional abgebildete Komponenten. Nachdem das Sekundärvolumen bzw. im Falle des Modells 804_Koppelung_V1+V2 auch das Primärvolumen in den gekoppelten 1D/3D-Motormodellen auch eine räumliche Auflösung besitzt, kommt es in diesen zu erkennbaren Verzögerungen der vorlaufenden Druckwellen.

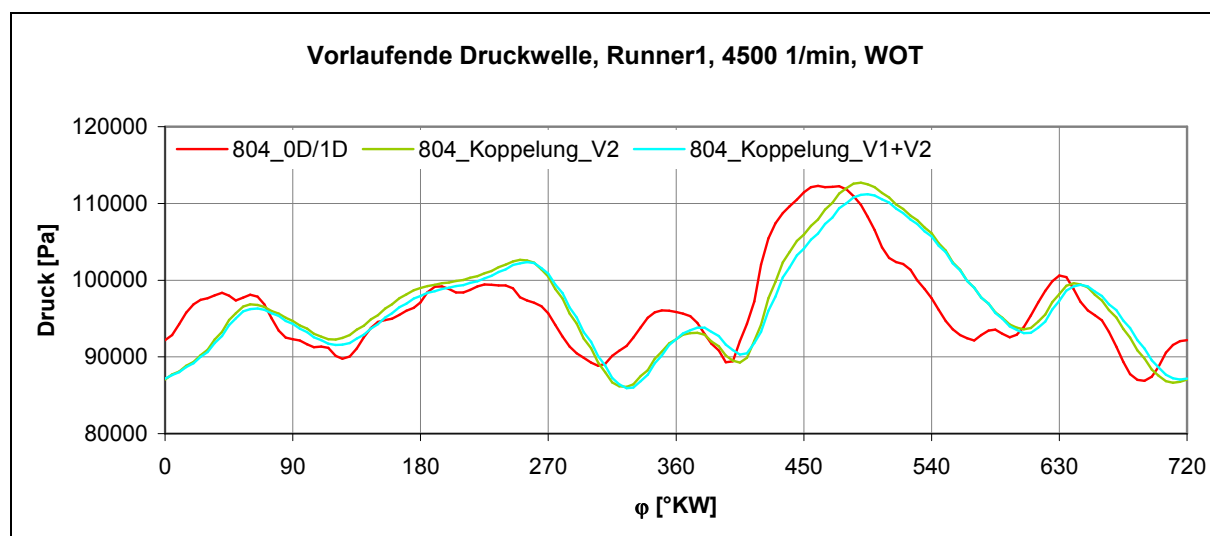


Abbildung 4-10: Vorlaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min

Für die Drehzahl 5500 1/min stimmen die zurücklaufenden Druckwellen ähnlich gut überein, wie bei 4500 1/min, weshalb nur die vorlaufenden Wellen betrachtet werden (siehe Abbildung 4-11). Dabei zeigt sich eine starke Abweichung der 0D/1D-Verläufe von denen der gekoppelten 1D/3D-Motormodelle. Da es sich bei dieser Abweichung nicht nur um eine Phasenverschiebung handelt, kann davon ausgegangen werden, dass, neben den durch die nulldimensionale Modellierung der Volumina entstehenden Laufzeitfehler, noch weitere Unterschiede, wie etwa vom 0D/1D-Motormodell nicht erfasste räumliche Strömungsphänomene, auftreten.

Die aus der damit abgeschlossenen Analyse gewonnenen Erkenntnisse, finden Eingang in die im Kapitel 5 vorgestellten Ansätze zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit von komplexen Geometrien.

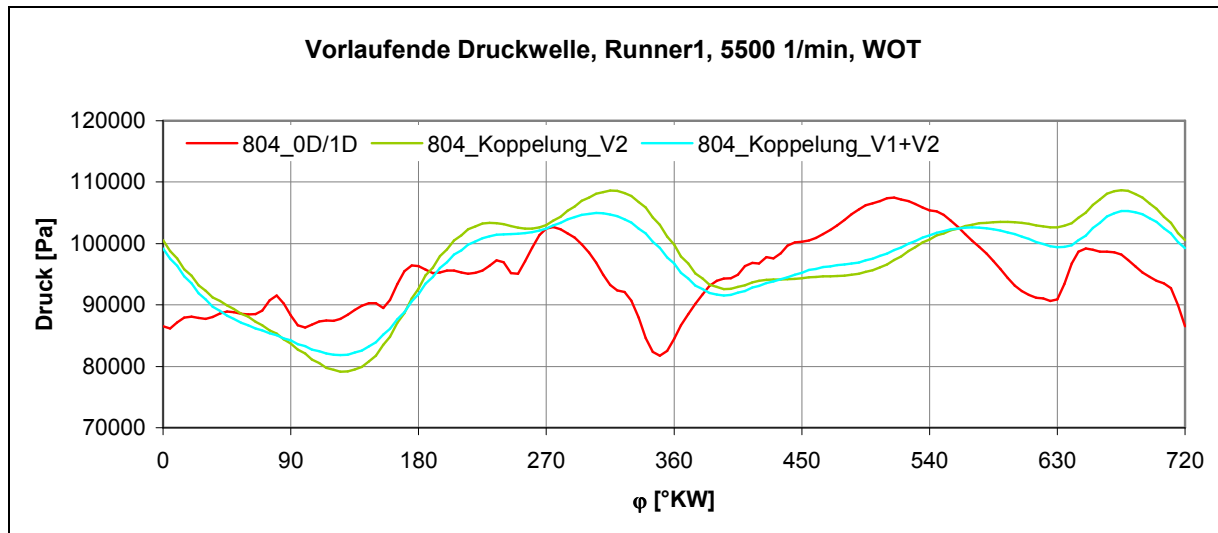


Abbildung 4-11: Vorlaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 5500 1/min

4.1.3 Vergleich der beiden gekoppelten 1D/3D-Motormodelle

Die Motivation für die, im Rahmen dieses Vergleiches durchgeführte, Analyse entspringt den in Kapitel 4.1.2 anhand der Drehzahlen 4500 und 5500 1/min gezeigten, für den Liefergrad entscheidenden Massenströme am Austritt des Runner1. Genauer gesagt ist es der, mit Hilfe der Verläufe aus Abbildung 4-1 deutlich werdende, fehlenden Zusammenhang dieser Größen zum indizierten Mitteldruck. Konkret weisen die beiden gekoppelten 1D/3D-Motormodelle bei 4500 1/min, im Gegensatz zu 5500 1/min, eine beträchtliche Abweichung des IMEP auf, während die Übereinstimmung hinsichtlich der erwähnten Massenströme für beide Drehzahlen in etwa gleich, wenn nicht sogar für die niedrigere Drehzahl geringfügig besser, ist (siehe Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8).

Die in Abbildung 4-12 dargestellte, über der Drehzahl aufgetragene, zu Beginn der Hochdruckphase (Start of High Pressure) in Zylinder1 befindliche Luftmasse, soll die vermutete gute Übereinstimmung der beiden gekoppelten Modelle hinsichtlich des Ladungswechsels untermauern. Selbstverständlich wurde diese Größe auch für den Zylinder2 ausgewertet. Da allerdings keine nennenswerten Unterschiede auftreten, wird, wie auch in weiterer Folge, auf die Abbildung dieser Ergebnisse verzichtet.

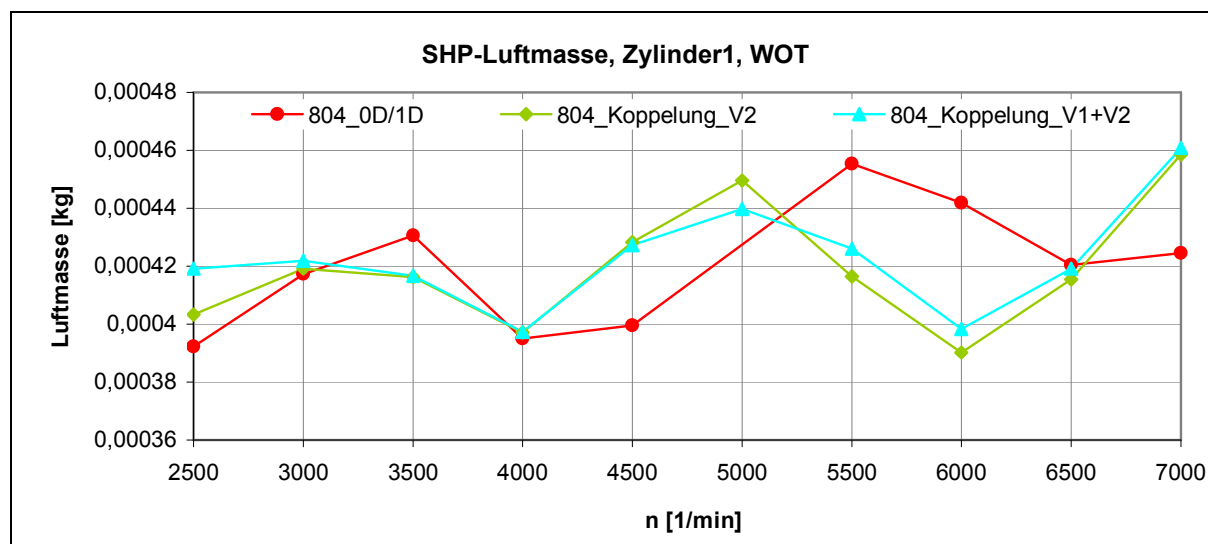


Abbildung 4-12: Luftmasse im Zylinder1 zu Beginn der Hochdruckphase

Damit ist nun eindeutig klar, dass die bei 4500 1/min auftretenden Abweichungen des indizierten Mitteldruckes nicht durch den Liefergrad bedingt sind. Um weiter Aufschlüsse zu erhalten, wurde für diese Drehzahl, wie in Abbildung 4-13 zu sehen, das pV-Diagramm für den Zylinder 1 ausgewertet. Die, auf Grund der gewählten Auflösung nicht erkennbaren, Abweichungen in der Ladungswechselschleife sind marginal. Dasselbe gilt für die Kompressionsphase. Im Rahmen der anschließenden Verbrennung kommt es allerdings zu einer deutlich sichtbaren Abweichung, deren Folgen auch während der Expansion zu erkennen sind.

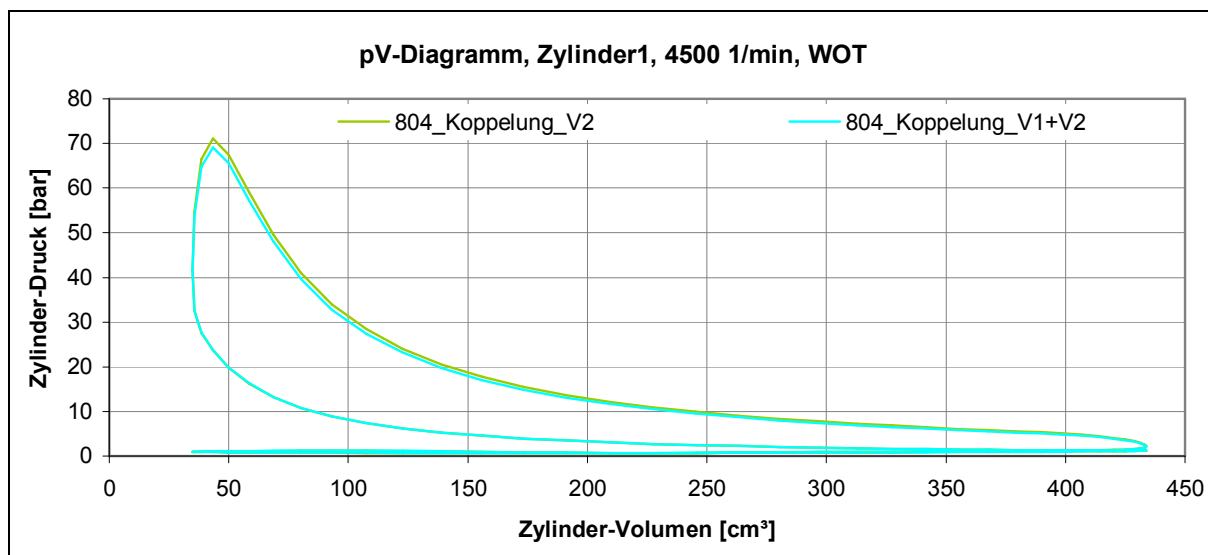


Abbildung 4-13: pV-Diagramm des Zylinder1 bei 4500 1/min

Damit scheint bereits klar zu sein, was durch die in Abbildung 4-14 dargestellten Verläufe des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses zu Beginn der Hochdruckphase bestätigt wird. Im gekoppelten Motormodell 804_Koppelung_V1+V2 gelangt deutlich weniger Kraftstoff in den Zylinder, als dies für das Modell 804_Koppelung_V2 der Fall ist, was auf Grund der Energieumsetzung, entsprechend eines mit Vibe-Parametern definierten Brennverlaufs, unweigerlich zu den bekannten Abweichungen im IMEP führt. [10] [12]

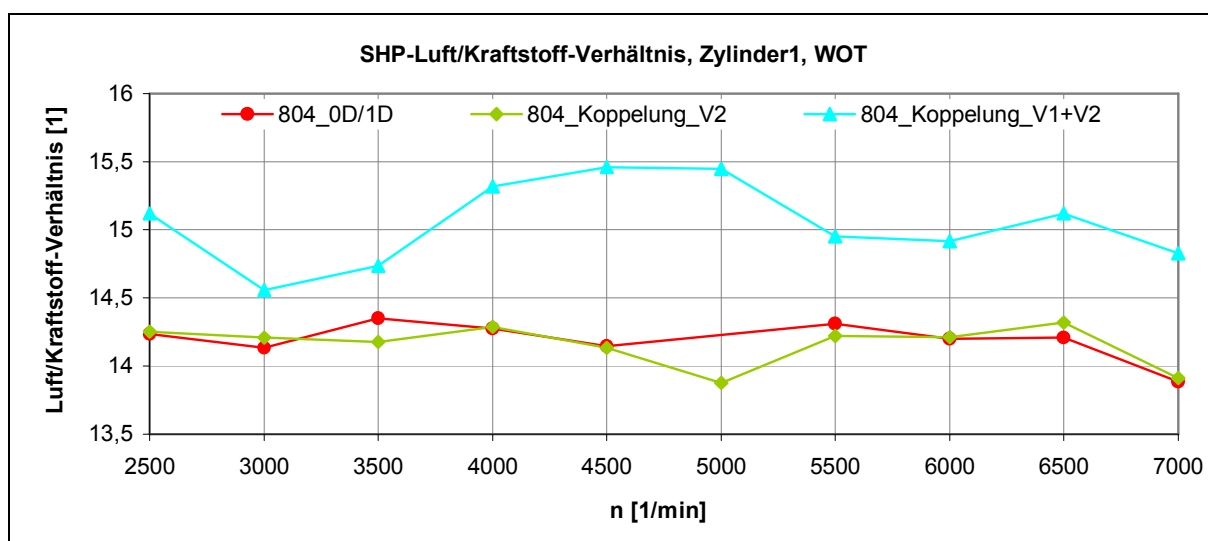


Abbildung 4-14: Luft/Kraftstoff-Verhältnis im Zylinder1 zu Beginn der Hochdruckphase

Infolgedessen stellt sich natürlich die Frage, wie es zu den unterschiedlichen, dem Zylinder zugeführten bzw. von diesem gefangenen, Kraftstoffmassen kommen kann. Dazu ist es zunächst einmal erforderlich über den Vorgang der Kraftstoffzufuhr Bescheid zu wissen. Für alle bisher betrachteten Motormodelle erfolgt dieser auf dieselbe Art und Weise. Wie Abbildung 4-15 zu entnehmen ist, wird der Kraftstoff über dezentral angeordnete Injektoren (I1, I2) in das Saugrohr eingebracht. Die Berechnung der einzuspritzenden Kraftstoffmasse erfolgt dabei über ein vorgegebenes Luft/Kraftstoff-Verhältnis und der, von bestimmten als Referenz-Messpunkten deklarierten Auswertestellen (Abbildung 4-15: MP17, MP5), je Zyklus erfassten Luftmassen. Des Weiteren sei noch angemerkt, dass der Kraftstoff

kontinuierlich, über 720 °KW verteilt, eingespritzt wird, sofort als verdampft und ideal mit der Luft vermischt gilt.

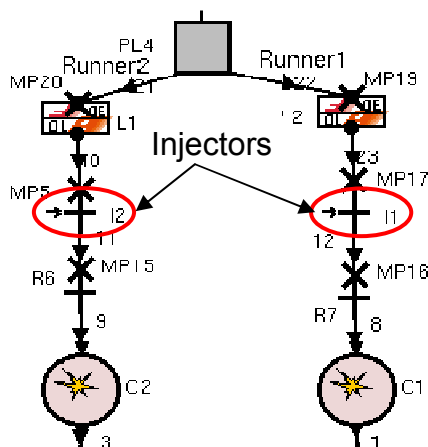


Abbildung 4-15: Saugrohre mit Injektoren und Referenz-Messpunkten

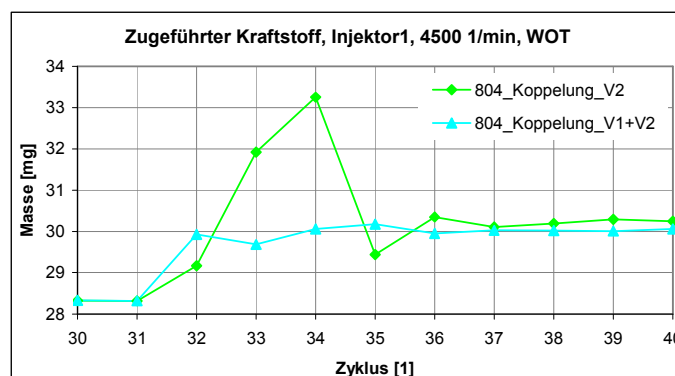


Abbildung 4-16: Eingespritzte Kraftstoffmasse, Injektor1, dargestellt über gekoppelt gerechnete Zyklen

Wie auf Grund der in Kapitel 4.1.2 dargestellten Massenströme, des für alle Modelle - bezogen auf eine Drehzahl – gleichen vorgegebenen Luft/Kraftstoff-Verhältnisses und der eben erklärten Zumessungsmethode angenommen werden musste, treten wie in Abbildung 4-16 ersichtlich zwischen den beiden gekoppelten Modellen hinsichtlich der eingebrachten Kraftstoffmasse keine Abweichungen auf, welche die Unterschiede im IMEP erklären würden. Die in Abbildung 4-16 erkennbare, um etwa 0,5% größere, eingespritzte Kraftstoffmasse des Modells 804_Koppelung_V2, erklärt sich durch einen etwas höheren Wert der detektierten Luftmasse am Referenz-Messpunkt. Abgesehen davon könnte eine derart kleine Abweichung hinsichtlich der eingespritzten Kraftstoffmenge, selbst bei gleicher Luftmasse, nur eine Abweichung des Luft/Kraftstoffverhältnisses in eben dieser Größenordnung, aber bei weitem nicht die tatsächlich vorhandene Differenz (ca. 9%, bei 4500 1/min) erklären. Nachdem, wie in Abbildung 4-17 zu sehen, im Modell 804_Koppelung_V1+V2 die zum Beginn der Hochdruckphase fehlende Kraftstoffmasse nicht einmal angesaugt wird, kann eine Erklärung, der stark unterschiedlichen Luft/Kraftstoff-Verhältnisse, über ungleiche Spülverluste ausgeschlossen werden.

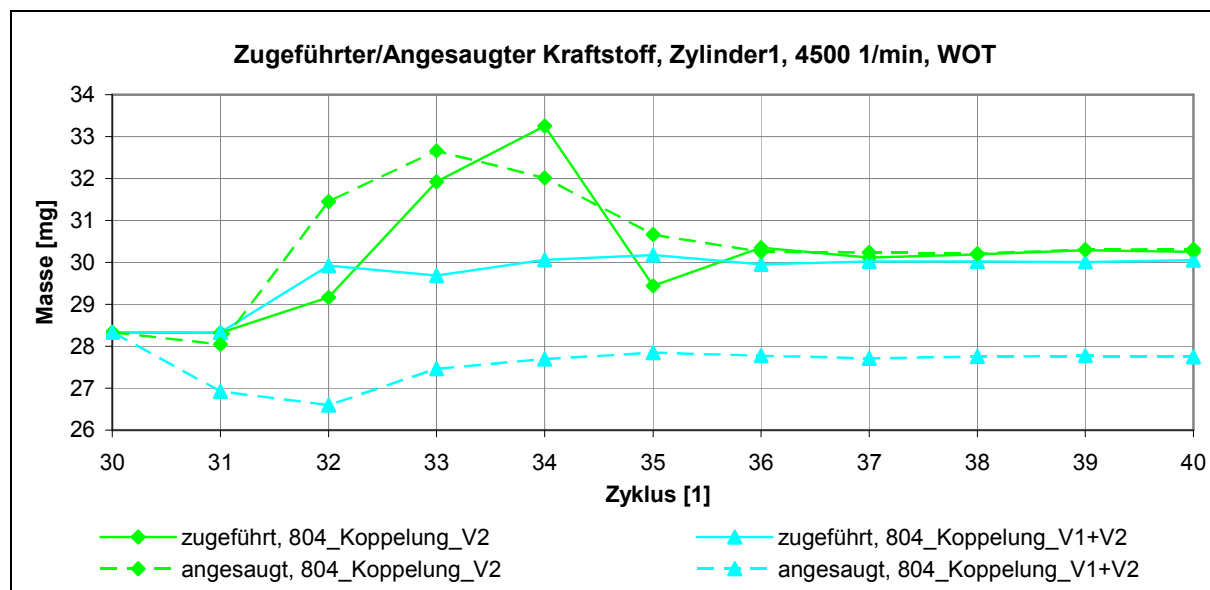


Abbildung 4-17: Zugeführte und angesaugte Kraftstoffmasse bezogen auf den Zylinder1

Die letzte in Frage kommende, physikalische Ursache für die beschriebene Problematik wäre eine Ansammlung des Kraftstoffes im Ansaugtrakt bzw. ein sehr starker Rückspüleffekt, der den Kraftstoff unverbrannt, über den Einlass, in die Umgebung transportiert. Durch geeignete Auswertungen konnten auch diese, zugegeben hochtheoretischen aber dennoch nicht völlig unmöglichen, Erklärungsansätze als nicht zutreffend erkannt werden. Ein damit vorliegender Kraftstoffschwund kann nur durch fehlerhaft gelöste Erhaltungsgleichungen bezüglich der Speziesmasse entstehen, was für einen Fehler im Modell spricht.

Nachdem festgestellt werden konnte, dass die Erhaltung der Speziesmasse sowohl in den 0D/1D-Abschnitten als auch im dazwischen liegenden 3D-Netz - betrachtet man diese Bereiche für sich alleine - jeweils erfüllt ist, waren die Koppelstellen in den Mittelpunkt des Interesses zu rücken.

Im Rahmen einer gekoppelten 1D/3D-Motorprozessrechnung mit AVL Fire werden für jede Koppelstelle zwei Dateien, in weiterer Folge als Übergabeprotokolle bezeichnet, angelegt, welche für jeden Zeitschritt die vom 0D/1D-Programm an AVL Fire bzw. die von AVL Fire an das 0D/1D-Programm übergebenen Werte der im Folgenden aufgelisteten Größen beinhalten:

- | | | | |
|-------------------|----------------------|---|--------|
| • Geschwindigkeit | [m/s] | • Kraftstoffmassenstrom | [kg/s] |
| • Druck | [Pa] | • Massenanteil des Kraftstoffes | [1] |
| • Dichte | [kg/m ³] | • Massenanteil des Restgases | [1] |
| • Massenstrom | [kg/s] | • Massenanteil des verbrannten Kraftstoffes | [1] |
| • Temperatur | [K] | | |

Mit der Analyse dieser Größen soll der oben angekündigten näheren Betrachtung der Koppelstellen Rechnung getragen werden. Begonnen wird mit dem Modell 804_Koppelung_V1+V2, also jenem, in dem es zum beschriebenen Kraftstoffschwund

kommt. Um evtl. erkennbare Ursachen für diesen möglichst deutlich zu sehen, wird, wie auch für die in weiterer Folge analysierten Modelle, die Rechnung der Drehzahl 4500 1/min herangezogen.

Vorweg sei noch eine Bemerkung zur Nomenklatur der Koppelstellen gemacht. Diese, auch als Fluid Links bezeichneten Verbindungen zwischen 0D/1D- und 3D-Bereich, besitzen jeweils eine Zahl zur eindeutigen Kennzeichnung. Allerdings wurde bei der Erstellung der in diesem Kapitel analysierten gekoppelten 1D/3D-Motormodelle nicht auf eine durchgängige Bezeichnung geachtet. So ist beispielsweise die Koppelstelle am Ende des Runner1 im Modell 804_Koppelung_V1+V2 mit der Fluid Link Nummer 1 versehen, während die entsprechende Koppelstelle im Modell 804_Koppelung_V2 die Bezeichnung 3 trägt. Um dennoch eine übersichtliche Darstellung zu garantieren, wurde eine eindeutige Farbuordnung gewählt. Dabei beziehen sich die türkisen Kurven auf den Fluid Link am Ende des Runner1, die hellgrünen auf die entsprechende Koppelstelle am Runner2, während die auf den Fluid Link am Einlass des Sekundärvolumens (804_Koppelung_V2) bzw. den Einlass des Primärvolumens (804_Koppelung_V1+V2) bezogenen Kurven in pink dargestellt sind.

In Abbildung 4-18 sind die an den jeweiligen Koppelstellen zwischen 0D/1D- und 3D-Bereich, während eines Zyklus, übergebenen Gesamtmassen aufgetragen. Um die, durch evtl. vorhandene Abweichungen zwischen den auf ein und dieselbe Koppelstelle bezogenen Verläufen, über einen Zyklus entstehenden Fehler besser abschätzen zu können, werden die kumulierten Massen und nicht die Massenströme dargestellt. Die Vorzeichen sind dabei so gewählt, dass eine Übereinstimmung der gestrichelten mit der durchgezogenen Kurve einer fehlerfreien Übergabe entspricht. Eine solche kann demnach für die in Abbildung 4-18 dargestellten Koppelstellen hinsichtlich der, durch die Luftmassenströme dominierten, Gesamtmassen nachgewiesen werden.

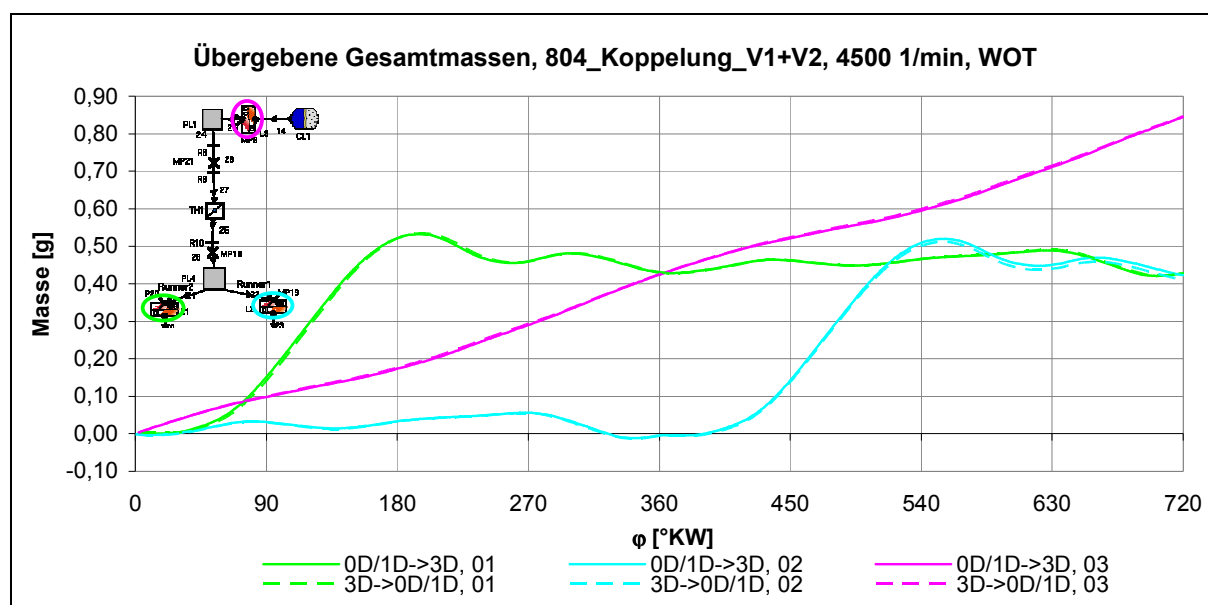


Abbildung 4-18: Gesamtmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2

Dies ändert sich, wenn man dieselbe Betrachtung für die Kraftstoffmassen durchführt. Wie in Abbildung 4-19 ersichtlich, zeigen die an den, am Ende der Runner positionierten, Koppelstellen übergebenen Kraftstoffmassen starke Abweichungen.

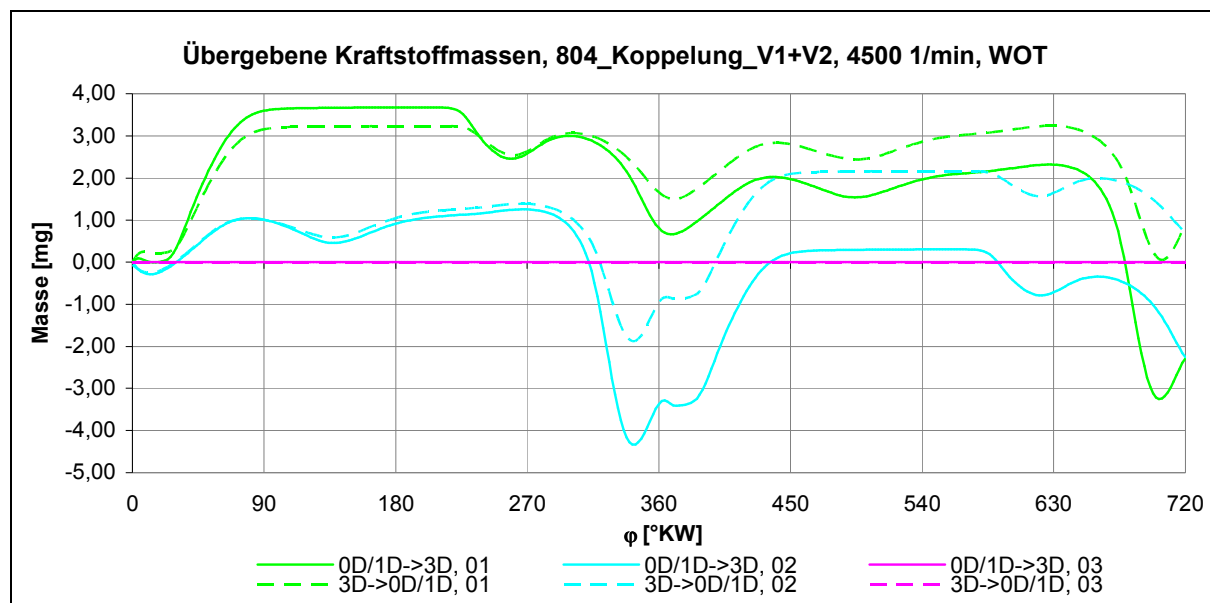


Abbildung 4-19: Kraftstoffmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2

In erster Linie müssten bei einer korrekt erfolgenden Übergabe, analog zu Abbildung 4-18, die gestrichelten mit den durchgezogenen Kurven übereinstimmen. Außerdem sollten im Falle der Kraftstoffmassen, bei der hier analysierten eingeschwungenen Lösung, alle vier Verläufe am Ende des Zyklus (720 °KW) den Wert null annehmen. Man bedenke, im Gegensatz zu der aus der Umgebung stammenden Luft, wird der Kraftstoff aus einem im selben 0D/1D-Abschnitt wie der Zylinder liegenden Injektor zugeführt. Über die rosa markierte Koppelstelle 03 kommt es zu keinem Kraftstofftransport und damit auch zu keinen Abweichungen. Sehr interessante Erkenntnisse liefert auch die Analyse der in den Übergabeprotokollen aufgezeichneten Zustandsgrößen. Stellvertretend dafür sind in Abbildung 4-20 die Verläufe der Temperatur dargestellt. Wie zu sehen ist, treten in den Koppelstellen 01 und 02, über die ein Kraftstofftransport stattfindet, deutliche Abweichungen auf, während an der Koppelstelle 03, die nicht mit Kraftstoff in Berührung kommt, eine perfekte Übereinstimmung zu erkennen ist.

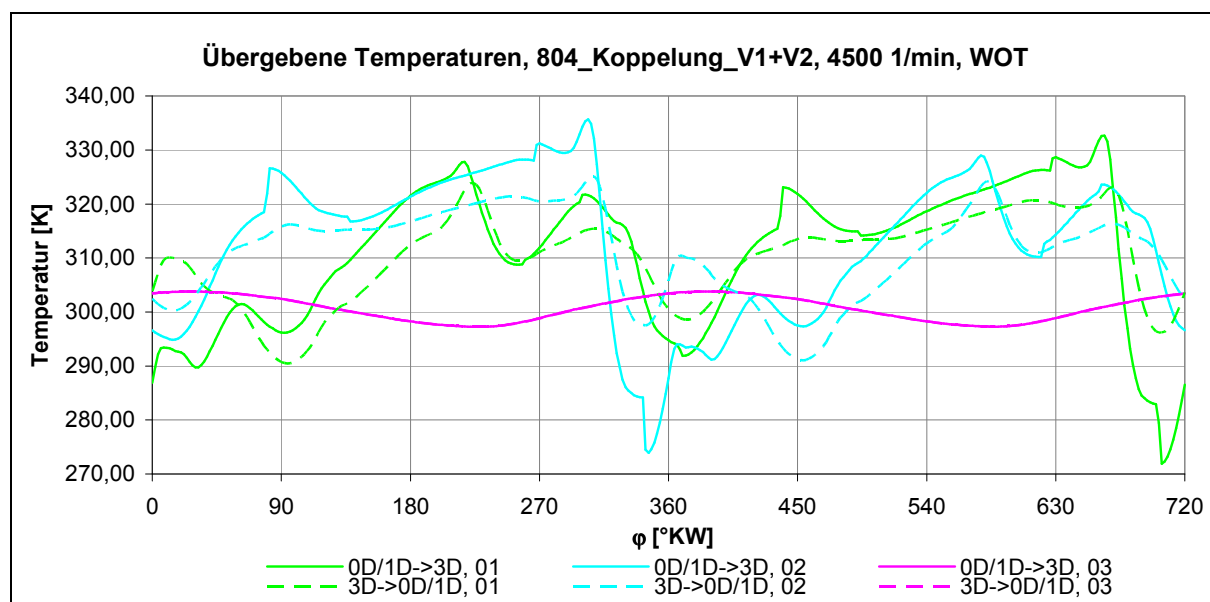


Abbildung 4-20: Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2

Betrachtet man Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 kann eine charakteristische Kurbelwinkelposition, an der die großen Abweichungen zwischen den gestrichelten und den durchgezogenen Kurven entstehen, festgestellt werden. Diese liegt sowohl für die, im Saugrohr des Zylinder1 positionierte, Koppelstelle 01 als auch für die, im Saugrohr des Zylinder2 angeordnete, Koppelstelle 02 kurz vor dem jeweiligen Ladungswechsel-OT.

Um den Zusammenhang zwischen dem Kraftstoffschwund und den mit Hilfe der Übergabeprotokolle festgestellten Problemen an den Koppelstellen abzusichern, wurde auch das Modell 804_Koppelung_V2, bei dem ja kein Kraftstoff verloren geht, einer solchen Analyse unterzogen. Hinsichtlich der Gesamtmassen konnten ähnlich unproblematische Verläufe wie beim gerade eben analysierten Modell 804_Koppelung_V1+V2 erkannt werden. Was den Kraftstofftransport angeht, ist zwar, wie Abbildung 4-21 zu entnehmen, auch hier keine perfekte Übereinstimmung gegeben, allerdings sind die Abweichungen deutlich kleiner, als jene zwischen den entsprechenden Verläufen des Modells 804_Koppelung_V1+V2 (siehe Abbildung 4-19). Darüber hinaus kommt es, über den gesamten Zyklus betrachtet, zu keinen nennenswerten Abweichungen, der auf eine Koppelstelle bezogenen Kurven. Auch die am Ende des Zyklus gegen null gehenden Werte, aller hier betrachten kumulierten Kraftstoffmassen, spricht für eine wesentlich korrektere Abbildung des Speziestranportes in diesem Modell.

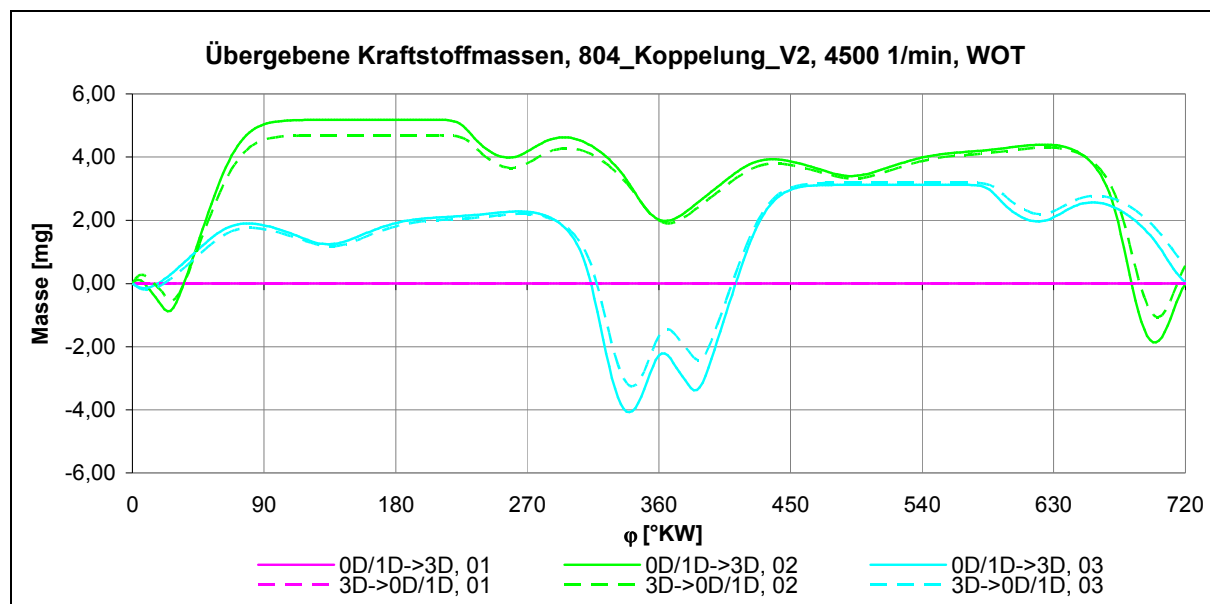


Abbildung 4-21: Kraftstoffmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V2

Die in Abbildung 4-22 dargestellten Temperaturverläufe deuten allerdings auf grundsätzliche Probleme der mit Kraftstoff in Kontakt stehenden Koppelstellen hin, welche - aus an dieser Stelle noch unbekanntem Gründen - im Modell 804_Koppelung_V2 zu weniger großen Fehlern hinsichtlich des Kraftstofftransportes führen als in 804_Koppelung_V1+V2.

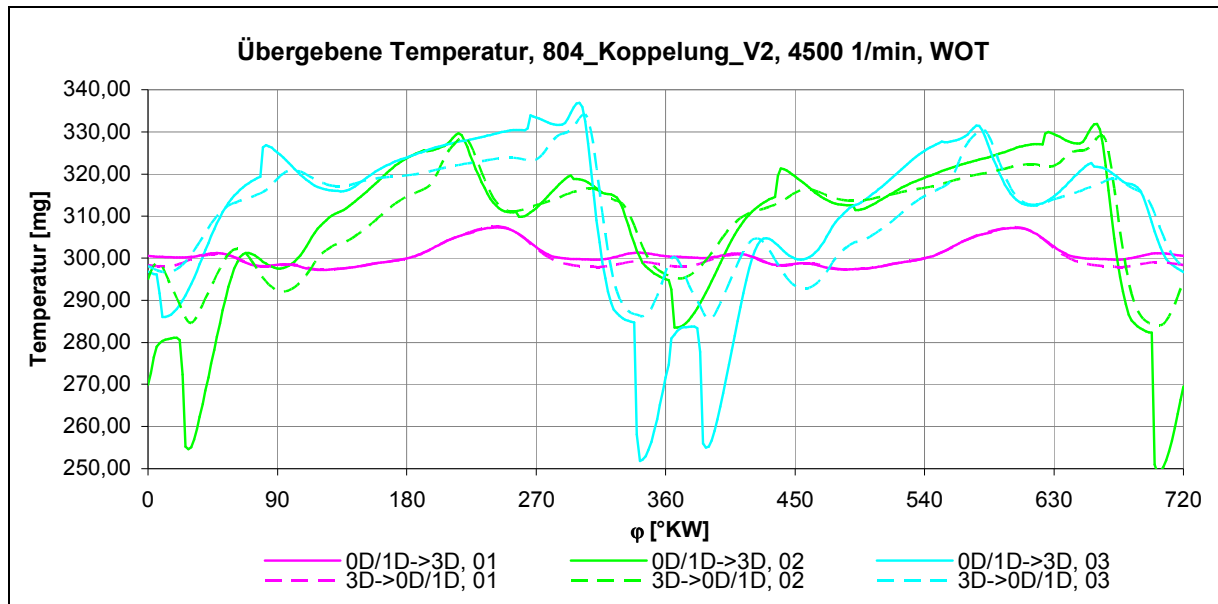


Abbildung 4-22: Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V2

4.2 Weitere gekoppelte 1D/3D-Motormodelle

Mit der in Kapitel 4.1.3 durchgeführten Analyse konnte gezeigt werden, dass die in Abbildung 4-1 dargestellten Abweichungen zwischen den beiden gekoppelten 1D/3D-Motormodellen zumindest nicht ausschließlich auf physikalischen Ursachen beruhen. Anhand weiterer gekoppelter 1D/3D-Motormodelle, die als Abwandlungen von den gerade eben analysierten zu verstehen sind, sollen die folgenden sich aufdrängenden Fragen beantwortet werden:

- Wie groß ist der ladungswechselbedingte Unterschied zwischen den Modellen 804_Koppelung_V2 und 804_Koppelung_V1+V2?
- Weshalb führen die, offensichtlich nicht einwandfrei funktionierenden, Koppelstellen im Modell 804_Koppelung_V1+V2 zum beschriebenen Kraftstoffschwund, während ein solcher in 804_Koppelung_V2 nicht auftritt?
- Können diese Fehlfunktionen durch geeignete Maßnahmen in der Modellbildung vermieden bzw. deren Auswirkungen klein gehalten werden?

4.2.1 DI-Modelle

Da die in Kapitel 4.1.3 ausführlich beschriebenen Probleme bislang ausschließlich in kraftstoffdurchspülten Koppelstellen festzustellen waren, sollten die Auswirkungen einer direkten Einbringung des Kraftstoffes in den Zylinder untersucht werden. Dazu wurden die aus dem letzten Kapitel bekannten Modelle entsprechend angepasst, als 804_Koppelung_V2_DI bzw. 804_Koppelung_V1+V2_DI bezeichnet und neu berechnet.

Die Analyse der, aus der Berechnung dieser Modelle hervorgehenden, Übergabeprotokolle deutet auf eine zufriedenstellende Funktion der Koppelstellen hin. Stellvertretend dafür sind in Abbildung 4-23 die Temperaturverläufe an den Übergabestellen des Modells 804_Koppelung_V1+V2_DI dargestellt. Die auf ein und dieselbe Koppelstelle bezogenen Kurven zeigen eine deutlich bessere Übereinstimmung, als die entsprechenden Verläufe, die mit externer Gemischbildung erzielt wurden (Abbildung 4-20, Abbildung 4-22).

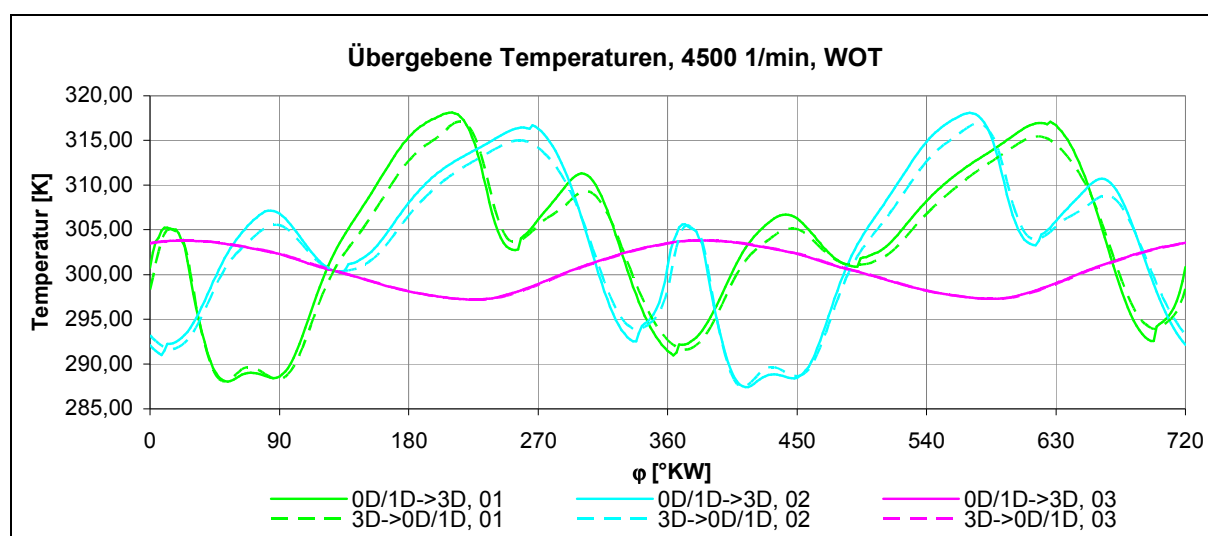


Abbildung 4-23: Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2_DI

Auf Grund der positiven Bewertung der Übergabeprotokolle, kann nun auch die in Abbildung 4-24 ersichtliche Gegenüberstellung der indizierten Mitteldrücke als aussagekräftig für die Abbildung des Ladungswechsels eingestuft werden. Wie zu sehen ist, liegen die Abweichungen zwischen den beiden Modellen, für beinahe alle Drehzahlpunkte, innerhalb des dargestellten 2%-Fehlerbereiches.

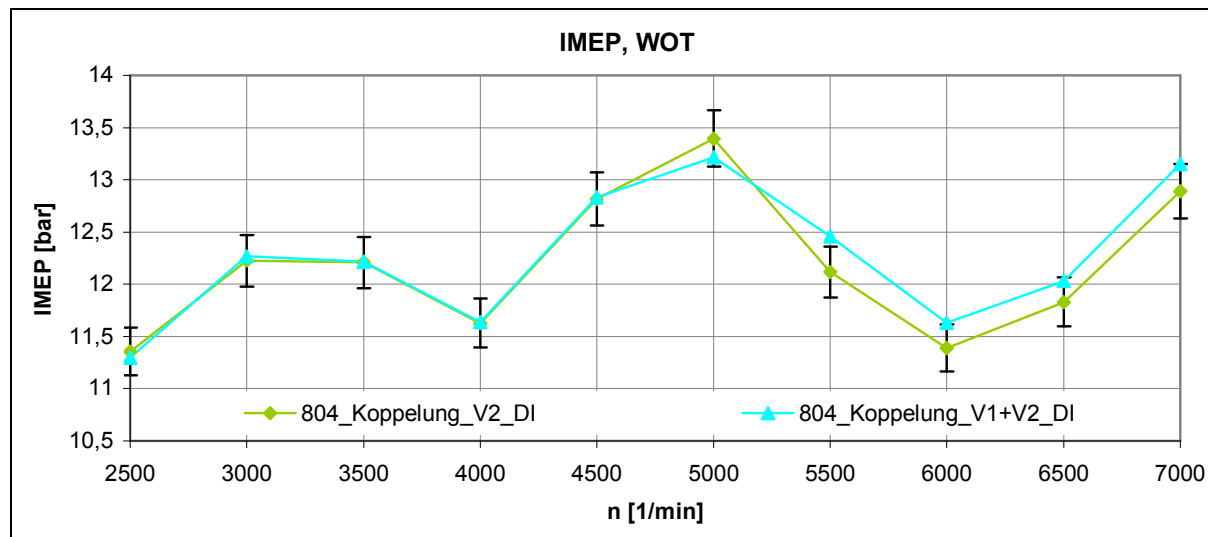


Abbildung 4-24: Indizierte Mitteldrücke über der Drehzahl, gekoppelte DI-Modelle

Abgesehen von der, für die hier vorgestellten DI-Modelle, funktionierenden Übergabe an den Koppelstellen, liegt der einzige Unterschied zu den ursprünglichen Modellen in der Art der Kraftstoffeinbringung. Da die Verdampfungswärme des eingespritzten Kraftstoffes gleich null gewählt und damit die, bei Direkteinspritzung normalerweise wirksame, Innenkühlung deaktiviert wurde, ist der Einfluss dieses Unterschiedes auf den Ladungswechsel als gering einzustufen. Außerdem würden sich derartige Effekte auf beide gekoppelte Modelle annähernd gleich auswirken.

Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit erwähnt und aus der Betrachtung der Ausgangsmodelle hinsichtlich ihrer in Abbildung 4-1 dargestellten IMEP-Verläufe hervorgeht, liefert das Modell 804_Koppelung_V1+V2, auf Grund der deutlich niedrigeren Mitteldrücke im mittleren und oberen Drehzahlbereich, eine bessere Annäherung an die am Prüfstand ermittelten Ergebnisse, als das Modell 804_Koppelung_V2. Diese niedrigeren Werte resultieren, wie nun bekannt ist, aus der infolge fehlerhaft arbeitender Koppelstellen auftretenden Abmagerung. Damit drängt sich nun die Frage nach der Übereinstimmung der, mit korrekt funktionierenden Fluid Links berechneten, Ergebnisse der DI-Modelle mit den Messdaten auf. Durch die Betrachtung der je Zyklus angesaugten Luftmasse, anstatt des indizierten Mitteldruckes, konnte der Einfluss einer möglicherweise unzureichend abgebildeten Verbrennung weitgehend ausgeschossen und damit der Fokus auf den Ladungswechsel gerichtet werden. Wie aus Abbildung 4-25 ersichtlich, sind die Abweichungen, zu deren besserer Einschätzung 5%-Fehlerindikatoren dargestellt sind, dennoch beträchtlich. Um die genaue Ursache für diese Abweichungen zu ergründen, wären weitere experimentell ermittelte Daten, wie an unterschiedlichen Stellen des Luftpfades gemessene Drücke, erforderlich. Nachdem der für die dargestellten Messdaten verantwortliche Prüfstands-aufbau nicht mehr vorhanden war, konnten solche Messungen im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

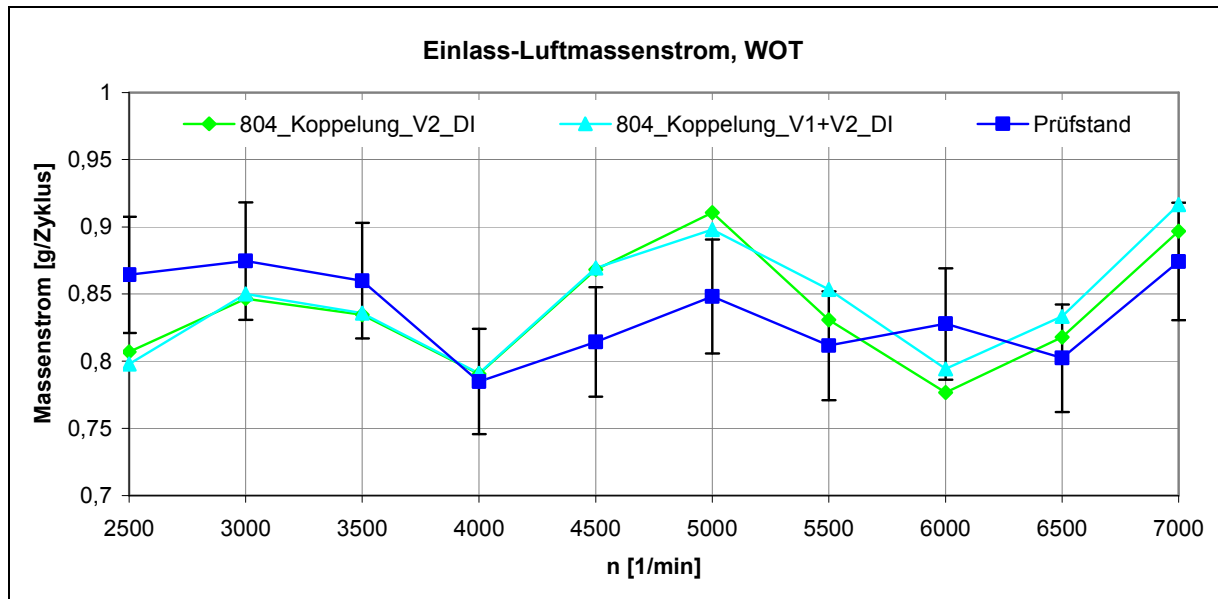


Abbildung 4-25: Vergleich der angesaugten Luftmassen

4.2.2 MPFI-Modelle mit verschobenen Koppelstellen

Wie der Name (Multi Point Fuel Injection) bereits vermuten lässt, sind die hier betrachteten Modelle, wie auch die in Kapitel 4.1 analysierten Ausgangsmodelle, mit einer dezentralen Saugrohreinspritzung ausgestattet. Bei diesen Varianten wurden die in den ursprünglichen Modellen sehr kurzen (38 mm) Rohre zwischen den Injektoren und den zylinderseitigen Koppelstellen (siehe Abbildung 4-15, Rohr23 und Rohr10) auf 100 mm ausgedehnt. Um eine Veränderung der Ansaugtraktlängen zu vermeiden, erfolgte eine entsprechende Verkürzung des 3D-Gebietes, was insgesamt einer Verschiebung der Koppelstellen entspricht.

Abbildung 4-26 zeigt die Verläufe der mit diesen Modellen berechneten indizierten Mitteldrücke. Vergleicht man die Abweichungen der beiden betrachteten Modelle mit jenen der DI-Modelle (siehe Abbildung 4-24), fällt eine etwas schlechtere Übereinstimmung im mittleren und eine etwas bessere Übereinstimmung im oberen Drehzahlbereich auf. Wie die Analyse der Ergebnisse gezeigt hat, sind diese unterschiedlichen Abweichungen auf zwei Effekte zurückzuführen. Einerseits werden im Falle der MPFI-Modelle die Runner, im Gegensatz zu den DI-Modellen, auf Grund der verschobenen Koppelstellen, nur mehr über einen Teil ihrer Länge dreidimensional abgebildet. Andererseits führt ein von 1 abweichender Fanggrad bei den MPFI-Modellen, nicht aber bei den DI-Modellen, zu Luft/Kraftstoff-Verhältnissen, die vom Vorgabewert abweichen. Der zweite Effekt spielt allerdings, infolge der viertakt-typisch auf einem sehr hohen Niveau liegenden Fanggrade, eine untergeordnete Rolle.

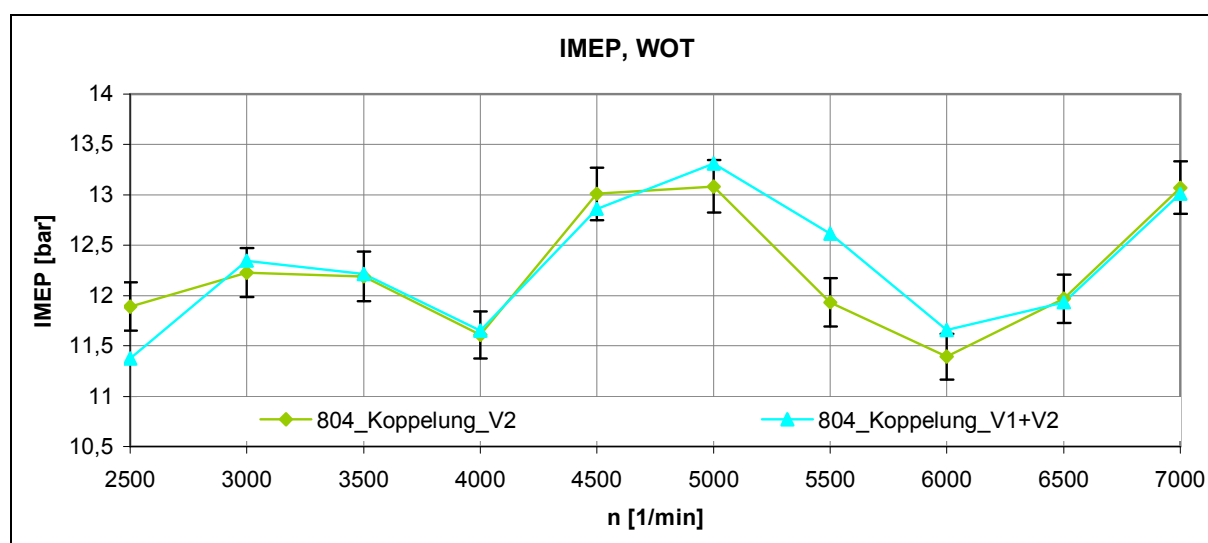


Abbildung 4-26: Vergleich der MPFI-Modelle mit verschobenen Koppelstellen

Die Übergabeprotokolle betreffend, liefern diese Modelle ähnlich gut übereinstimmende Verläufe der untersuchten Größen wie die oben betrachteten DI-Modelle. Nachdem an den Koppelstellen, auf Grund des nun größeren Abstandes zu den Injektoren, praktisch kein Kraftstoff mehr detektiert werden konnte, sind diese Rechnungen als Bestätigung für den ursächlichen Zusammenhang zwischen kraftstoffdurchspülten Koppelstellen und den bekannten Abweichungen zu verstehen.

4.2.3 SPFI-Modelle

Um herauszufinden ob, wie aus den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Ergebnissen geschlossen werden könnte, tatsächlich die geringen Abstände zwischen Injektoren und Koppelstellen bzw. der damit verbundene Kraftstoffkontakt der Fluid Links alleine ursächlich für die aus den Übergabeprotokollen bekannten Probleme sind, wurden die im Folgenden näher erläuterten, durch eine zentrale Kraftstoffeinspritzung (Single Point Fuel Injection) gekennzeichneten Modell-Varianten untersucht.

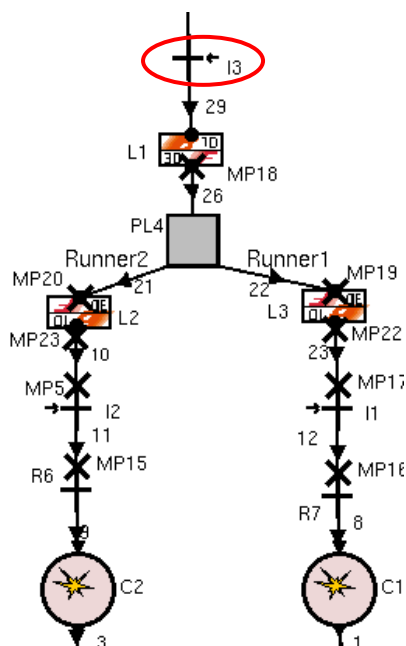


Abbildung 4-27: Ansaugtrakt der SPFI-Modelle

Der dazu erforderliche Injektor wurde wie in Abbildung 4-27 ersichtlich vor der ersten Koppelstelle angeordnet, was den einzigen Unterschied zum Ausgangsmodell 804_Koppelung_V2 darstellt. Wie ebenfalls in Abbildung 4-27 zu sehen, bleiben die dezentralen Injektoren (I1, I2) der Einfachheit halber im Modell erhalten, führen allerdings keinen Kraftstoff mehr zu.

Um die eingangs erwähnte Frage zu klären, wurde die Länge von Rohr 29 (siehe Abbildung 4-27) und damit der Abstand zwischen Koppelstelle und Kraftstoffzuführung variiert. Die Analyse der Übergabeprotokolle weist für alle durchgeführten Variationen eine einwandfreie Funktion der Fluid Links nach. Damit sind sehr nahe an den Koppelstellen angeordnete Injektoren als alleiniger Grund für die bekannten Übergabeprobleme auszuschließen.

4.2.4 Einfluss der Integrationsvolumina

Auf der Suche nach Unterschieden zwischen den beiden in Kapitel 4.1.3 analysierten gekoppelten 1D/3D-Motormodellen, welche ursächlich für den stark unterschiedlichen Kraftstofftransport über die Koppelstellen sind, konnten, wie in Abbildung 4-28 dargestellt, ungleiche Integrationsvolumina an den Enden der Runner festgestellt werden. Während diese im Modell 804_Koppelung_V2 (Abbildung 4-28 - links) aus fünf Zellschichten zu je 1 mm bestehen, wurden in 804_Koppelung_V1+V2 (Abbildung 4-28 - rechts) zehn Zellschichten mit je einer Dicke von 2 mm verwendet.

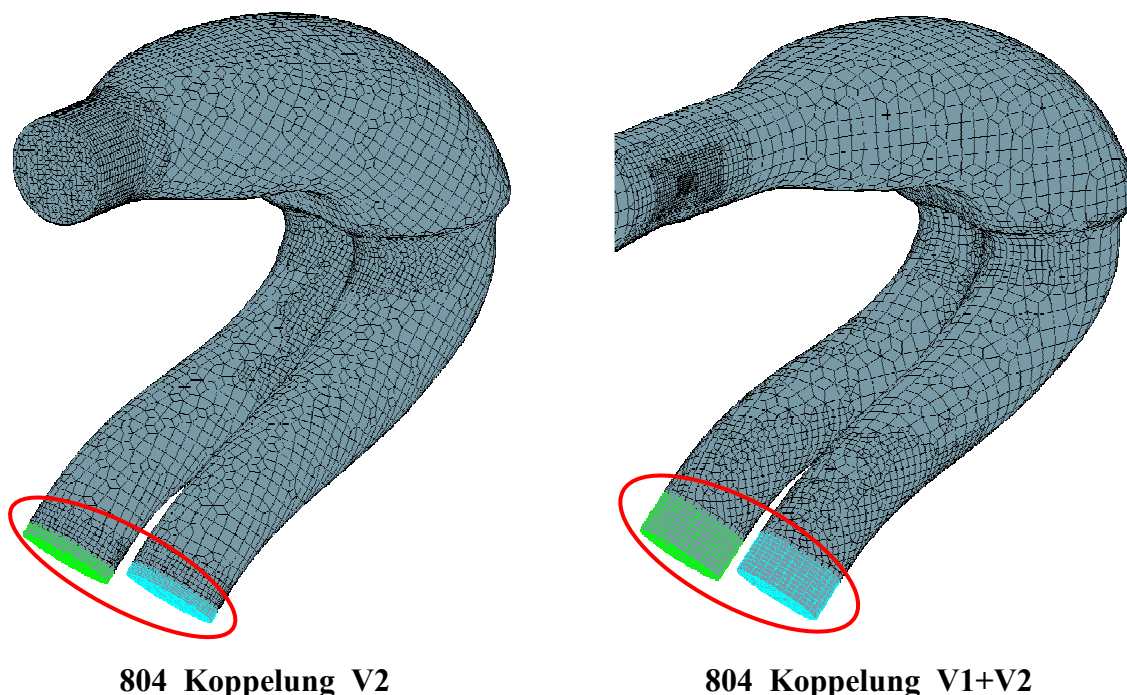


Abbildung 4-28: Integrationsvolumina der beiden gekoppelten Ausgangsmodelle

Um den Einfluss dieses Unterschiedes herauszufinden, wurde zunächst einmal 804_Koppelung_V2 mit den großen Integrationsvolumina (10x2mm) ausgestattet und das damit entstandene Modell der Rechnung des Drehzahlpunktes 4500 1/min unterzogen. Bei der Auswertung der daraus resultierenden Ergebnisse konnten ähnlich hohe Werte des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses zu Beginn der Hochdruckphase festgestellt werden, wie beim Modell 804_Koppelung_V2. Selbstverständlich wurde auch der umgekehrte Weg bestritten, also 804_Koppelung_V1+V2 mit den kleineren Integrationsvolumina (5x1mm) versehen und für die Drehzahl 4500 1/min neu berechnet, wodurch die Abweichungen der übergebenen Kraftstoffmassenströme - gegenüber der Ausgangsvariante mit den großen Integrationsvolumina - stark verringert werden konnte. Infolgedessen liegen auch die Werte für das Luft/Kraftstoff-Verhältnis zu Beginn der Hochdruckphase auf einem wesentlich niedrigeren Niveau. Um den Einfluss dieser, zur Mittelung der Strömungsgrößen aufgebracht, Zellen etwas genauer zu erforschen, wurden anschließend beide Modelle mit noch kleineren Integrationsvolumina - konkret drei Zellschichten zu je 1mm - versehen und wiederum der Rechnung für 4500 1/min unterzogen. Diese Modellvarianten führen ebenfalls zu fehlerhaften, also voneinander abweichenden Verläufen in den Koppelstellen, welche in diesem Fall allerdings keine Abmagerung sondern eine Anfettung des Luft-

Kraftstoffgemisches zufolge haben. Abschließend wurde für beide Modelle noch eine Rechnung ohne Angabe von Integrationsvolumina durchgeführt. In einem solchen Fall werden, lt. [1], die jeweils letzten Zellschichten an den Rändern des 3D-Bereiches als Integrationsvolumina verwendet. Die mit diesen Modellen erzielten Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine große Ähnlichkeit zu jenen, die vorhin unter Verwendung der kleinen Integrationsvolumina (3x1mm) erzielt wurden.

Abschließend ist anzumerken, dass die für die Ausgangsmodelle durchgeführten Variationen der Integrationsvolumina auch bei den DI- und den SPFI-Modellen angewandt wurden, dort allerdings keinen Einfluss auf die Ergebnisse zeigten.

4.2.5 Resümee über gekoppelte 1D/3D-Motormodelle

Wie mit Hilfe der in Kapitel 4.2 vorgestellten abgewandelten Modelle gezeigt werden konnte, ist der tatsächliche, also physikalisch belegbare, Unterschied zwischen den beiden gekoppelten Ausgangsmodellen deutlich kleiner, als auf Grund der ursprünglich erzielten Ergebnisse angenommen werden musste. Des Weiteren ist aus den neuen Ergebnissen hinsichtlich Übereinstimmung mit den Messdaten kein Vorteil jener gekoppelten Modelle, welche auch das Primärvolumen dreidimensional abbilden, gegenüber denen, die nur das Sekundärvolumen und die Runner räumlich aufgelöst betrachten, zu erkennen. Weshalb die Berechtigung ersterer, auf Grund der größeren Zellenanzahl und des daraus resultierenden höheren Rechenaufwandes, in Frage zu stellen ist.

Was die Suche nach den Ursachen für die unter anderem im Ausgangsmodell 804_Koppelung_V1+V2 auftretenden Probleme in den Koppelstellen betrifft, sind die einem Anwender der Programme AVL Fire bzw. AVL Boost zur Verfügung stehenden Mittel nach der Analyse der Übergabeprotokolle ausgeschöpft. Allerdings kann auch ohne Kenntnis der genauen Ursache, basierend auf der Vielzahl an durchgeführten gekoppelten Berechnungen, die gleichzeitige Erfüllung der folgenden Bedingungen als problematisch festgehalten werden:

- Kraftstoffkontakt: Die bekannten Probleme sind nur in kraftstoffdurchströmten Koppelstellen aufgetreten.
- Zylindernahe Anordnung der Koppelstellen: Mit Hilfe der SPI-Modelle konnte gezeigt werden, dass der Kraftstoffkontakt alleine noch nicht zu den abweichenden Verläufen in den Übergabeprotokollen und den daraus resultierenden Kraftstoffschwund führt. Damit scheint auch das in den Koppelstellen wirksame Strömungsfeld erheblichen Einfluss zu haben.
- Ungeeignete Wahl der Integrationsvolumina: Wie mit Hilfe der in Kapitel 4.2.4 durchgeführten Variationsrechnungen gezeigt werden konnte, müssen die Integrationsvolumina, im Falle einer Erfüllung der ersten beiden Punkte, innerhalb eines sehr engen Toleranzbereiches liegen damit es zu keinen Problemen in den Koppelstellen kommt. Diese Bedingung ist im Allgemeinen also als erfüllt zu betrachten.

Da der, zur sicheren Vermeidung eines Kraftstofftransportes über die Koppelstelle, erforderliche Abstand zwischen dieser und dem Injektor von vornherein genauso wenig bekannt ist, wie die am besten geeignete Größe der Integrationsvolumina, ist es im Falle von MPFI-Modellen kaum möglich die Erfüllung der oben genannten Bedingungen und damit das Auftreten der Übergabefehler sicher auszuschließen. Deshalb ist es in diesen Fällen besonders wichtig im Zuge der Auswertung die zugeführte Kraftstoffmasse (*Added Fuel*) mit der angesaugten Kraftstoffmasse (*Aspirated Fuel*) zu vergleichen. Im eingeschwungenen Zustand sollten diese, über den letzten gerechneten Zyklus betrachteten, Größen eine gute Übereinstimmung zeigen. Treten Abweichungen auf, deuten diese auf Probleme in der Koppelstelle hin, welche durch eine Analyse der Übergabeprotokolle genauer untersucht werden sollten.

Ein weiteres, ebenfalls zu beträchtlichen Fehlern führendes, Problem soll an dieser Stelle auch nicht unerwähnt bleiben. Werden die Referenz-Messpunkte für die Kraftstoffzufuhr zu nahe an den Injektoren angeordnet, detektieren diese einen viel zu hohen Luftmassenstrom, was bei der Zumessung des Kraftstoffes über ein vorgegebenes Luft/Kraftstoffverhältnis zu einer ungewünschten Anfettung führt. Daher sollte neben der Wahl möglichst großer Abstände zwischen Injektoren und Referenz-Messpunkten diese Problematik auch in der Auswertung berücksichtigt werden. Dazu eignet sich der Vergleich der mit dem Fanggrad multiplizierten vom Referenzpunkt erfassten Luftmasse mit jener die sich zu Beginn der Hochdruckphase im Zylinder befindet (*SHP-Airmass*). Dieses Problem, welches im Übrigen auch bei nicht gekoppelten also reinen 0D/1D-Modellen auftritt, ist erst seit Boost v2009 zu beobachten und betrifft daher die in Kapitel 4.1 analysierten Ergebnisse, die mit Boost v5.1.1 berechnet wurden, nicht.

4.3 0D/1D-Alternativmodelle

Neben der Untersuchung der räumlichen Strömungsphänomene, die zu den bekannten Unterschieden zwischen den 0D/1D- und den gekoppelten 1D/3D-Motormodellen führen, sowie der Entwicklung von Methoden zur Voraussage dieser (siehe Kapitel 5) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch versucht, durch eine Optimierung des 0D/1D-Motormodells die Ergebnisse dessen an jene der gekoppelten 1D/3D-Motormodelle anzunähern. Der Fokus wurde dabei, wie im Folgenden näher erläutert, auf die Modellierung des Sekundärvolumens gerichtet.

Auf Grund der, im Vergleich zu den Querschnitten der angeschlossenen Rohre, relativ kleinen Abmessungen des Sekundärvolumens, scheint eine nulldimensionale Abbildung dessen mit Hilfe eines Plenums, wie sie im ursprünglichen 0D/1D-Motormodell (siehe Abbildung 4-29 - links) erfolgte, ungeeignet zu sein. Daher wurde versucht durch den Ersatz des Plenums mit Hilfe eines Rohres bzw. der Kombination mehrerer Rohre, also durch räumlich eindimensional aufgelöste Komponenten, eine bessere Annäherung an die gekoppelten Modelle zu erreichen. Von der großen Anzahl an getesteten Alternativen zeigte die in Abbildung 4-29 - rechts dargestellte sehr einfache Variante, welche das Sekundärvolumen lediglich durch ein einziges Rohr mit einem konischen sowie einem zylindrischen Abschnitt und eine Junction (Refined Model) abbildet, die besten Ergebnisse.

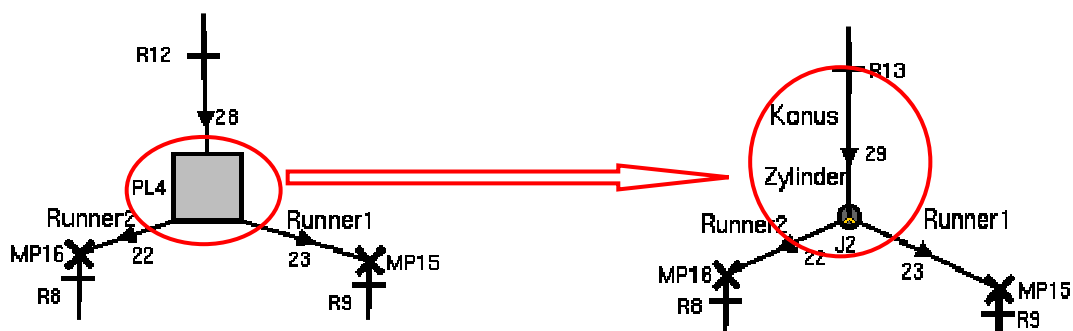


Abbildung 4-29: 0D/1D-Modelle des Sekundärvolumens der 804-Zweivolumenvariante

Bei der Wahl der Abmessungen für das Rohr 29 (siehe Abbildung 4-29 - rechts) wurde auf eine Erhaltung des Volumens geachtet, wodurch die Geometrie allerdings bei weiten noch nicht eindeutig bestimmt ist. Der von den Runnern eingeschlossene Winkel wurde mit 0° , die anderen beiden mit 180° definiert. Hinsichtlich der Aufteilung des Volumens zwischen konischen und zylindrischen Rohrabschnitt wurden, genauso wie für den Konuswinkel, mehrere Variationen untersucht. Abbildung 4-30 zeigt die von zwei solchen Varianten gelieferten Mitteldruckverläufe. Die ebenfalls dargestellten Ergebnisse des ursprünglichen 0D/1D- bzw. eines gekoppelten 1D/3D-Motormodells sollen als Referenz dienen. Da für das gekoppelte Modell, um die oben beschriebenen Probleme hinsichtlich Kraftstofftransport sicher zu vermeiden, eine Direkteinspritzung modelliert wurde, war, aus Gründen der Vergleichbarkeit, eine derartige Einbringung des Kraftstoffes auch für die anderen drei Modelle das Mittel der Wahl. Nachdem die IMEP-Verläufe zur Beurteilung der unterschiedlichen Abbildungen des Ladungswechsels herangezogen werden und damit die Absolutwerte von untergeordneter Bedeutung sind, ist diese Vorgehensweise in jedem Fall

zulässig. Wie die Gegenüberstellung zeigt konnte mit den neu entwickelten 0D/1D-Modellen, vor allem im mittleren und oberen Drehzahlbereich, eine deutlich bessere Annäherung an die gekoppelte Simulation erzielt werden. Diese Tatsache wird durch die dargestellten Fehlerindikatoren, die einen 5%-Streubereich um die Ergebnisse des gekoppelten Modells markieren, unterstrichen.

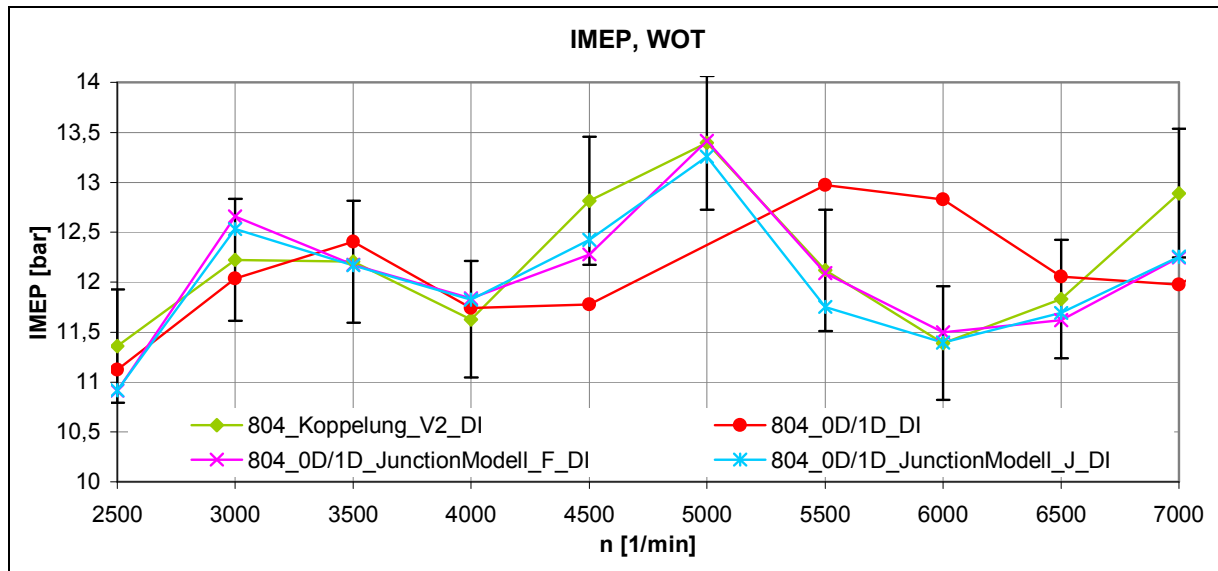


Abbildung 4-30: Indizierte Mitteldrücke der 0D/1D-Alternativmodelle

Es muss an dieser Stelle allerdings auch erwähnt werden, dass eine Abweichung von 5%, wie sie bei 7000 1/min auftritt, noch keinem zufriedenstellenden Ergebnis entspricht. Außerdem ist die bereits erwähnte Vorgehensweise, welche auch eine Optimierung geometrischer Eingabeparameter durch Variationsrechnungen beinhaltet, im Sinne einer Vorausberechnung als kritisch einzustufen. Sehrwohl kann aber aus dieser Untersuchung das Potential von 0D/1D-Motormodellen erkannt werden. Dies gilt umso mehr, als dass die hier betrachteten Alternativmodelle noch kein Optimum darstellen müssen.

5 Bewertungsmethoden zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit

Wie die Analysen in Kapitel 4 zeigen, können anhand der, an geeigneten Stellen des Motormodells ausgewerteten, vor und zurücklaufenden Druck- bzw. Saugwellen gegebenenfalls vorhandene Fehler in der 0D/1D-Abbildung der von diesen Wellen zurückzulegenden Wege aufgedeckt werden. Solche, häufig aus dem ungeeigneten Einsatz von 0D-Komponenten resultierende, Unzulänglichkeiten machen aber, wie beispielsweise die im Sekundärvolumen der 804-Zweivolumenvariante auftretenden stark dreidimensionalen Effekte zeigen, bei weitem nicht den einzigen Unterschied zwischen den Strömungsfeldern des 0D/1D- bzw. des 3D-Modells einer komplexen Geometrie aus. Daher muss auch die Ursache für die ladungswechselbedingten Abweichungen des indizierten Mitteldruckes entsprechend vielschichtiger angenommen werden. Nachdem, wie in Kapitel 4.1.1 ausgeführt, kein eindeutig quantifizierbarer Zusammenhang zwischen großen Abweichungen hinsichtlich IMEP (zwischen 0D/1D- und 3D-Modell) und dem Auftreten räumlicher Strömungsphänomene festgestellt werden konnte, eine Koppelung solcher Effekte an bestimmte geometrische Abmessungen ohnehin als äußerst schwierig angenommen werden muss, wurde eine grundlegende Entscheidung getroffen. Infolge dieser wird es als sinnvoll erachtet, die Frage nach der 0D/1D-Abbildbarkeit nicht nur anhand der 3D-Geometrie, sondern unter Einbeziehung in Frage kommender 0D/1D-Modelle zu beantworten. Vereinfacht gesagt wird eine Methode angestrebt, die unter Verwendung des 3D-Modells und dessen möglicher 0D/1D-Abbildung als Eingabedaten eine Größe berechnet, die als Abweichung der beiden Modelle verstanden werden kann. Selbstverständlich muss ein direkter Zusammenhang dieser Abweichung, zu jener gefordert werden, die sich in der Motorprozessrechnung zwischen einem gekoppelten Modell, welches die komplexe Geometrie dreidimensional aufgelöst berücksichtigt und einem 0D/1D-Motormodell, welches das zu testende 0D/1D-Abbild dieser komplexen Geometrie beinhaltet, ergibt. In diesem Kapitel werden mehrere nach den eben beschriebenen Grundzügen konzipierte Methoden vorgestellt, welche hinsichtlich ihrer Eignung zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit von komplexen Geometrien getestet wurden. Ziel aller hier betrachteten Untersuchungen war, mit einem Rechenaufwand, der deutlich unter jenem einer gekoppelten 1D/3D-CFD-Simulation liegt, eine größtmögliche Voraussagequalität zu erreichen. Um die durchgeführten Methoden zu verifizieren, werden sowohl 0D/1D- als auch gekoppelte 1D/3D-Motormodelle herangezogen. Demnach gilt eine Bewertungsmethode dann als geeignet, wenn sie in der Lage ist die Übereinstimmung zwischen diesen Motormodellen vorauszusagen.

Des Weiteren sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass für alle nachfolgenden Rechnungen die Stoffdaten reiner Luft verwendet wurden, was für Motoren mit Direkteinspritzung und dezentraler Saugrohreinspritzung exakt richtig ist aber auch für eine zentrale Einbringung des Kraftstoffes vor dem Ansaugluftverteiler eine sehr gute Annäherung darstellt.

Bevor in Kapitel 5.3 mit der *Stoßwellenbeaufschlagung* die erste dieser Methoden näher beschrieben wird, soll ein Überblick über die betrachteten Geometrien gegeben bzw. das Ergebnis der Verifizierungsrechnungen dargestellt werden.

5.1 Betrachtete Geometrien

Bei den zur Überprüfung der Bewertungsmethoden untersuchten Geometrien, die im Folgenden überblicksartig vorgestellt werden, handelt es sich um mögliche Formen für Ansaugluftverteiler von Zweizylindermotoren. Nachdem, auf Grund des Rechenaufwandes für die gekoppelte Motorprozessrechnung, die zur Bereitstellung der Verifizierungsdaten für jede der betrachteten Geometrien durchgeführt werden muss, ohnehin nur eine sehr begrenzte Anzahl an möglichen Varianten untersucht werden kann und bereits ein gekoppeltes Zweizylinder-Motormodell vorhanden ist, erscheint die Beschränkung auf solche Verteilerformen naheliegend. Es sei allerdings an dieser Stelle in aller Deutlichkeit darauf hingewiesen, dass sich diese Einschränkung nur auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Tests bezieht. Die Methoden an sich, wurden so konzipiert, dass eine Bewertung von Ansaugluftverteilergeometrien für Motorkonzepte mit anderen Zylinderzahlen ebenso möglich ist.

5.1.1 Y-Verteiler

Bei der in Abbildung 5-1 dargestellten Geometrie handelt es sich um die denkbar einfachste Rohrverzweigung mit 3 Anschlussstellen. Die Bezeichnungen der Rohre wurden, wie auch für die in weiterer Folge betrachteten Ausführungen, in Anlehnung an die Verwendung dieser Komponenten im Motormodell gewählt. Dementsprechend wird, über einen Zyklus betrachtet, Luft vom Einlassrohr kommend durch die Runner zu den Zylindern transportiert. Hinsichtlich der Wahl der Rohrdurchmesser erfolgte die Orientierung am Ansaugtrakt der 804-Zweivolumenvariante, wobei auf eine Erhaltung des Gesamtquerschnittes über die Verzweigung geachtet wurde. Was die 0D/1D-Modellierung betrifft, scheint diese Verzweigung geradezu prädestiniert für eine Abbildung mit Hilfe einer Junction (siehe 3.1.1.5) zu sein.

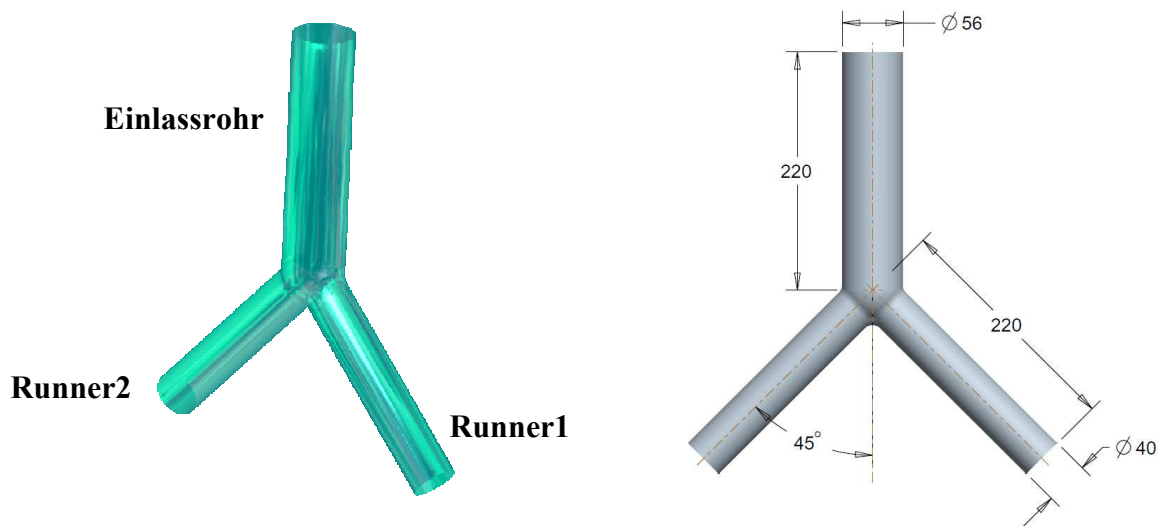


Abbildung 5-1: Geometrische Beschreibung des Y-Verteilers

Um Missverständnissen vorzubeugen, sei hier erwähnt, dass es sich bei dieser Geometrie, wie auch bei dem im nächsten Punkt vorgestellten Würfel-Verteiler, keinesfalls um einen ernst gemeinten Vorschlag für die Ausführung von Ansaugluftverteilern handelt, sondern lediglich um eine, mit 0D/1D-Elementen mehr oder weniger gut modellierbare, Prinzipgeometrie.

5.1.2 Würfel-Verteiler

Was die Abmessungen der Rohre betrifft, gilt für den in Abbildung 5-2 ersichtlichen Würfel-Verteiler selbiges, wie für den eben beschriebenen Y-Verteiler. Im Hinblick auf die 0D/1D-Abbildung bietet sich ein Plenum an. Wobei auf die in Kapitel 3.1.1.4 erläuterte Problematik, die sich bei der Beschreibung relativ kleiner Volumina mit Hilfe dieser Komponente ergibt, hingewiesen sei.

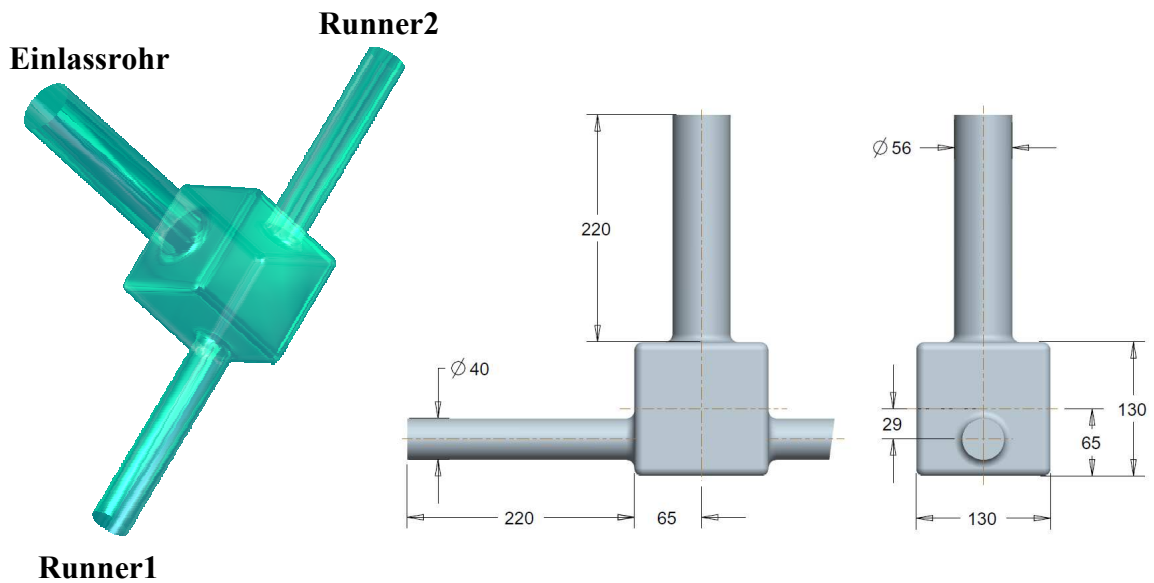


Abbildung 5-2: Geometrische Beschreibung des Würfel-Verteilers

5.1.3 804-V2

Bei der in Abbildung 5-3 dargestellten Form handelt es sich um das aus Kapitel 4 bekannte Sekundär volumen der 804-Zweivolumenvariante. Wie auf den ersten Blick ersichtlich, ist die Formgebung dieser Variante zu komplex, um in diesen Rahmen eine vollständige Beschreibung der Abmessungen anzuführen, weshalb lediglich die Anschlussdurchmesser angegeben werden.

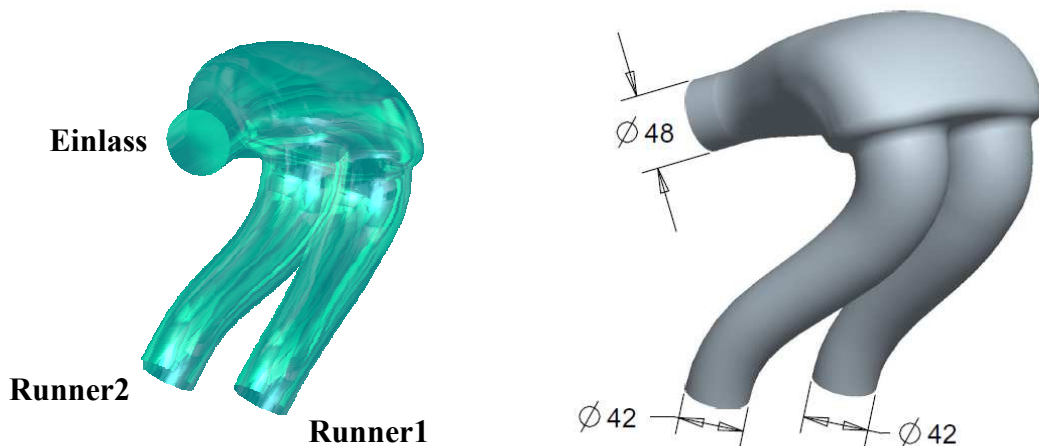


Abbildung 5-3: Beschreibung der Geometrie 804-V2

5.1.4 804-V2*

Wie bereits die Bezeichnung vermuten lässt, besitzt der in Abbildung 5-4 ersichtliche Ansaugluftverteiler eine aus der Geometrie 804_V2 abgeleitete Form. Genauer gesagt liegt der einzige Unterschied, den 804_V2* gegenüber 804_V2 aufweist, in den Runnern, deren Durchmesser hier, im Gegensatz zur ursprünglich konischen Form, über die gesamte Länge konstant sind.

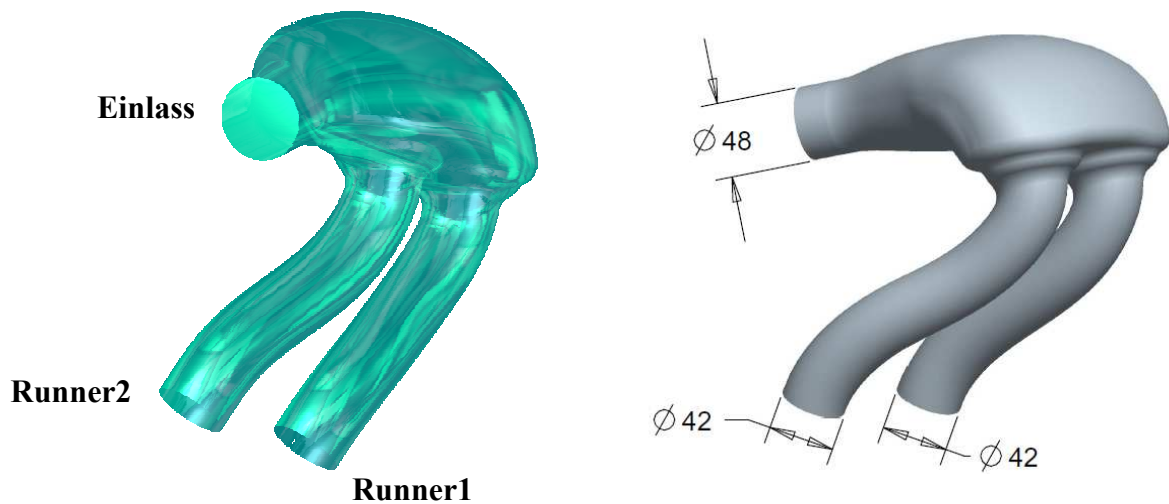


Abbildung 5-4: Beschreibung der Geometrie 804-V2*

Eine Untersuchung dieser Geometrie war von vornherein nicht angedacht. Erst die in Kapitel 5.4 und 5.5 beschriebenen Ergebnisse machten diese erforderlich. Das ist auch der Grund, weshalb 804-V2* in 5.3 noch nicht betrachtet wurde.

5.2 Verifizierung der Methoden

Um die getesteten Methoden hinsichtlich ihrer Fähigkeit, die 0D/1D-Abbildbarkeit mehr oder weniger komplexer Geometrien vorauszusagen, zu bewerten, müssen die Unterschiede, welche sich zwischen der 0D/1D- und der 3D-Beschreibung dieser Geometrien im Motormodell ergeben, bekannt sein. Aus diesem Grund wird das 0D/1D- bzw. das 3D-Modell jeder untersuchten Geometrie in ein 0D/1D- bzw. ein gekoppeltes 1D/3D-Motormodell implementiert. Als Basismodell dient dabei die 804-Zweivolumenvariante, wobei das Sekundärvolumen durch die zu untersuchende Geometrie ersetzt wird. Die Unterschiede, die sich dabei zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodellen hinsichtlich indiziertem Mitteldruck ergeben, gilt es mit den jeweiligen Methoden vorherzusagen. Grundsätzlich wäre auch die Verwendung ladungswechselspezifischer Größen, wie Liefergrad oder Luftaufwand denkbar. Der Grund weshalb die Wahl dennoch auf den indizierten Mitteldruck fiel, liegt in der weiten Verbreitung dieser Größe und der daraus folgenden, guten Abschätzbarkeit von tolerierbaren Abweichungen zwischen den verschiedenen Simulationsmodellen.

Um den in Kapitel 4 ausführlich erläuterten Problemen, welche bei gekoppelten Modellen mit einem Kraftstofftransport über die Koppelstellen unter Umständen auftreten, von vornherein aus dem Weg zu gehen, erfolgt die Kraftstoffeinspritzung, bei allen zur Verifizierung der getesteten Methoden berechneten Modellen, direkt in die Zylinder. Da nicht der indizierte Mitteldruck als absolute Größe, sondern dessen Abweichung zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodell betrachtet wird, ist diese Vorgehensweise in jedem Fall zulässig.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse dieser Verifizierungsrechnungen für die unterschiedlichen Ansaugluftverteilergeometrien dargestellt. Die Überschriften der einzelnen Kapitel sind dabei entsprechend der Namen der als Ansaugluftverteiler verwendeten in Kapitel 5.1 vorgestellten Geometrien gewählt.

5.2.1 Y-Verteiler

In Abbildung 5-5 sind jene Verläufe des indizierten Mitteldruckes zu sehen, welche die 804-Zweivolumenvariante liefert, wenn das ursprüngliche Sekundärvolumen durch den in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Y-Verteiler ersetzt wird. Der Grund, weshalb hier zwei 0D/1D-Verläufe zu sehen sind, liegt in den unterschiedlichen von AVL Boost angebotenen Möglichkeiten Rohrverzweigungen abzubilden (siehe 3.1.1.5), die hier getestet werden sollten. Wie zu sehen ist, sind die Unterschiede bei sehr niedrigen Drehzahlen praktisch nicht vorhanden. Während im mittleren Drehzahlbereich das 0D/1D-Modell mit der Constant-Static-Pressure-Junction eine etwas bessere Annäherung an das gekoppelte Modell liefert, weist das 0D/1D-Modell mit der Refined-Model-Junction, in dieser Hinsicht, im oberen Drittel des Drehzahlbandes Vorteile auf. Die, wie auch in allen weiteren Diagrammen der Verifizierungsrechnung angeführten, 5%-Fehlerindikatoren sollen der besseren Vergleichbarkeit dienen.

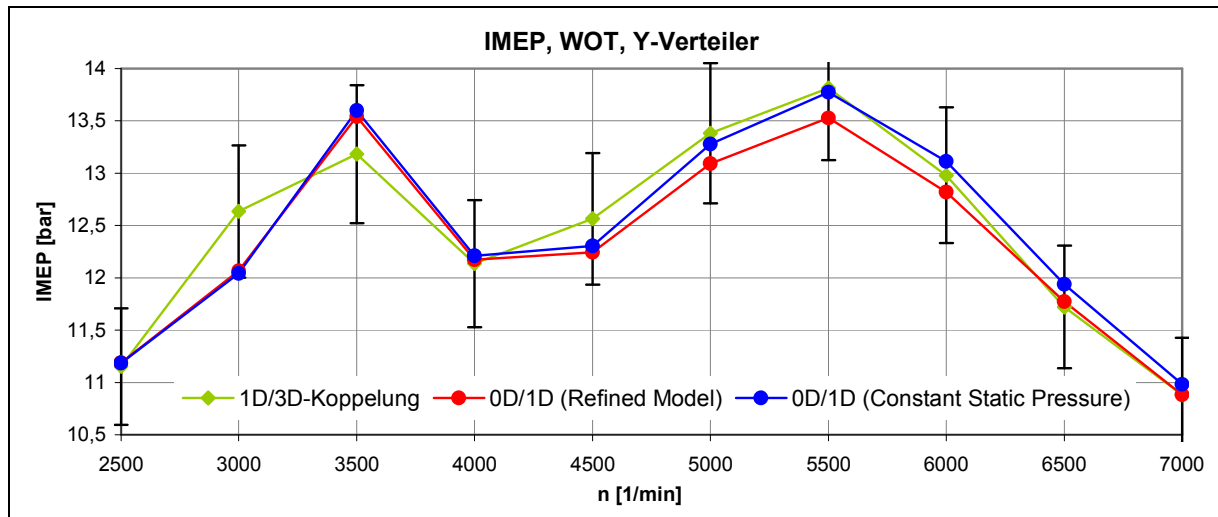


Abbildung 5-5: IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit Y-Verteiler

5.2.2 Würfel-Verteiler

Abbildung 5-6 zeigt die indizierten Mitteldrücke, die sich beim Einsatz des Würfel-Verteilers als Sekundärvolumen ergeben. Dabei fällt zunächst einmal der sehr flache Verlauf im unteren und mittleren Drehzahlbereich auf. Wesentlich entscheidender, für die hier durchgeführten Betrachtungen, ist allerdings eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Modell, wie sie bereits in Kapitel 5.2.1 festgestellt werden konnte.

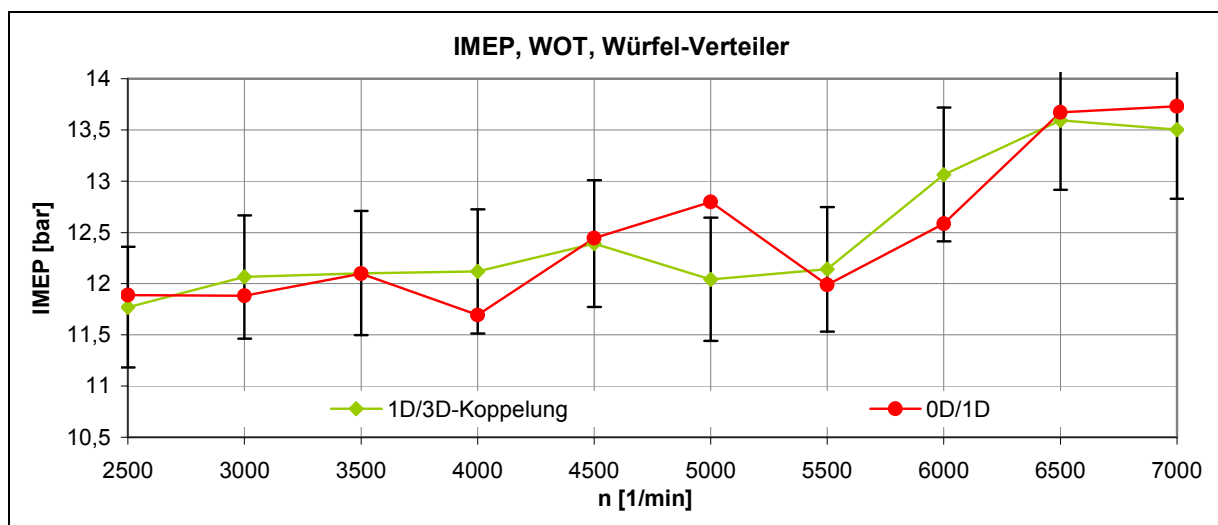


Abbildung 5-6: IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit Würfel-Verteiler

5.2.3 804-V2

Bei den in Abbildung 5-7 dargestellten Verläufen handelt es sich um die Mitteldrücke die sich unter Verwendung des ursprünglichen Sekundärvolumens ergeben.

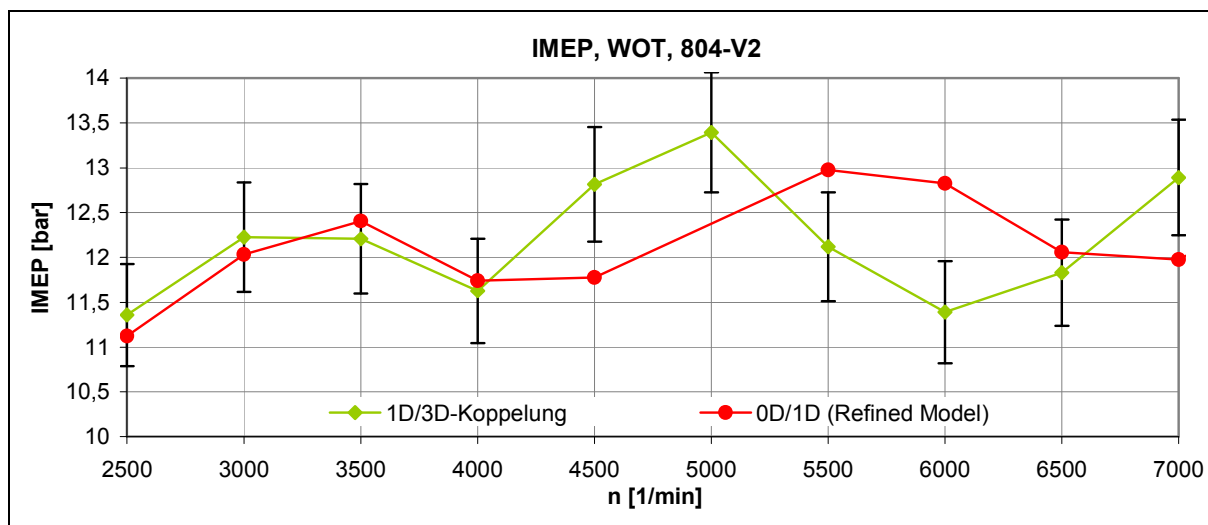


Abbildung 5-7: IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit ursprünglichem Sekundärvolumen

Wie bereits aus Kapitel 4 bekannt und auf Grund der – verglichen mit dem Y- bzw. den Würfel-Verteiler - deutlich komplexeren Form dieser Rohrverzweigung auch zu erwarten war, sind die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Modellen deutlich größer als im Falle der Prinzipgeometrien.

5.2.4 804-V2*

Abgesehen von einer etwas schlechteren Übereinstimmung im unteren Drehzahlbereich und einer geringfügig besseren Annäherung bei der Drehzahl 4500 1/min, bewirken die konstanten Runner-Durchmesser, wie in Abbildung 5-8 ersichtlich, keine größeren Veränderungen hinsichtlich der Abweichungen zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Modell.

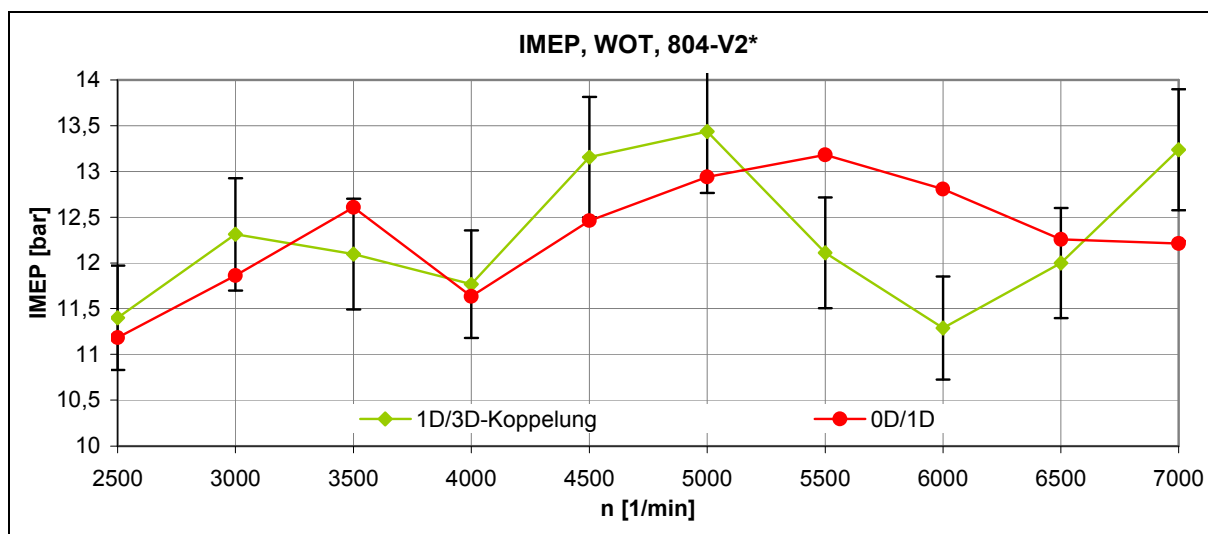


Abbildung 5-8: IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit 804-V2*

5.3 Stoßwellenbeaufschlagung

Da die Ausbreitung der Druckwellen im Ansaugtrakt von Verbrennungskraftmaschinen keinen stoßwellenähnlichen Charakter hat, ist diese Methode sicher nicht geeignet um den realen Strömungszustand möglichst exakt nachzubilden. Vielmehr wird versucht eine Aussage über die Laufzeit der Druckwellen bzw. über evtl. vorhandene Unterschiede dieser, zwischen 0D/1D- und 3D-Modell, zu erzielen.

Einem typischen Anfangswertproblem entsprechend, werden alle zwischen Ein- und Auslassrandbedingung liegenden Zellen mit einem konstanten Druck und einer konstanten Temperatur initialisiert. Während die Auslassrandbedingung mit den Anfangsbedingungen im Inneren übereinstimmt, weist der Druck an der Einlassrandbedingung einen erhöhten Wert auf. Da im Luftpfad von freisaugenden Verbrennungskraftmaschinen die Temperaturdifferenzen, im Vergleich zu den Druckdifferenzen, klein und damit von untergeordneter Bedeutung sind, wurde auf die Vorgabe eines Temperaturgefälles verzichtet.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Untersuchung der in Kapitel 5.1 vorgestellten Geometrien mit Hilfe der *Stoßwellenbeaufschlagung* erläutert. Während in 5.3.1, anhand des Y-Verteilers, die Vorgehensweise ausführlich beschrieben wird, sind in 5.3.2 bzw. 5.3.3 nur die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

5.3.1 Würfel-Verteiler

Da der Y-Verteiler eine symmetrische Form aufweist und auch die Randbedingungen der *Stoßwellenbeaufschlagung* symmetrisch sind, ist es ausreichend das 3D-Modell als Viertel-Modell auszuführen. Dabei wird, wie in Abbildung 5-9 zu sehen, nur ein Viertel der eigentlichen Geometrie vernetzt und an den Symmetrieebenen die in AVL Fire zu Verfügung stehende Symmetrie-Randbedingung verwendet. Durch diese Vorgehensweise kann man natürlich einerseits Zellen und damit Rechenzeit sparen, andererseits werden damit von vornherein asymmetrische Ergebnisse, die bei einem 3D-Modell der gesamten Geometrie durch leichte Asymmetrien im Netz entstehen können, ausgeschlossen.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden sowohl im Eintritts- als auch im Austrittsquerschnitt der statische Druck und die Temperatur vorgegeben. Damit können im 0D/1D- und im 3D-Modell exakt dieselben Randbedingungen gewählt werden (siehe Abbildung 5-9). Wie die in den nächsten Unterkapiteln beschriebenen Methoden zeigen werden, ist dies keine Selbstverständlichkeit. Bei der Wahl des Druckgefälles erfolgte die Orientierung an den im Motormodell der 804-Zweivolumentvariante auftretenden Drücke.

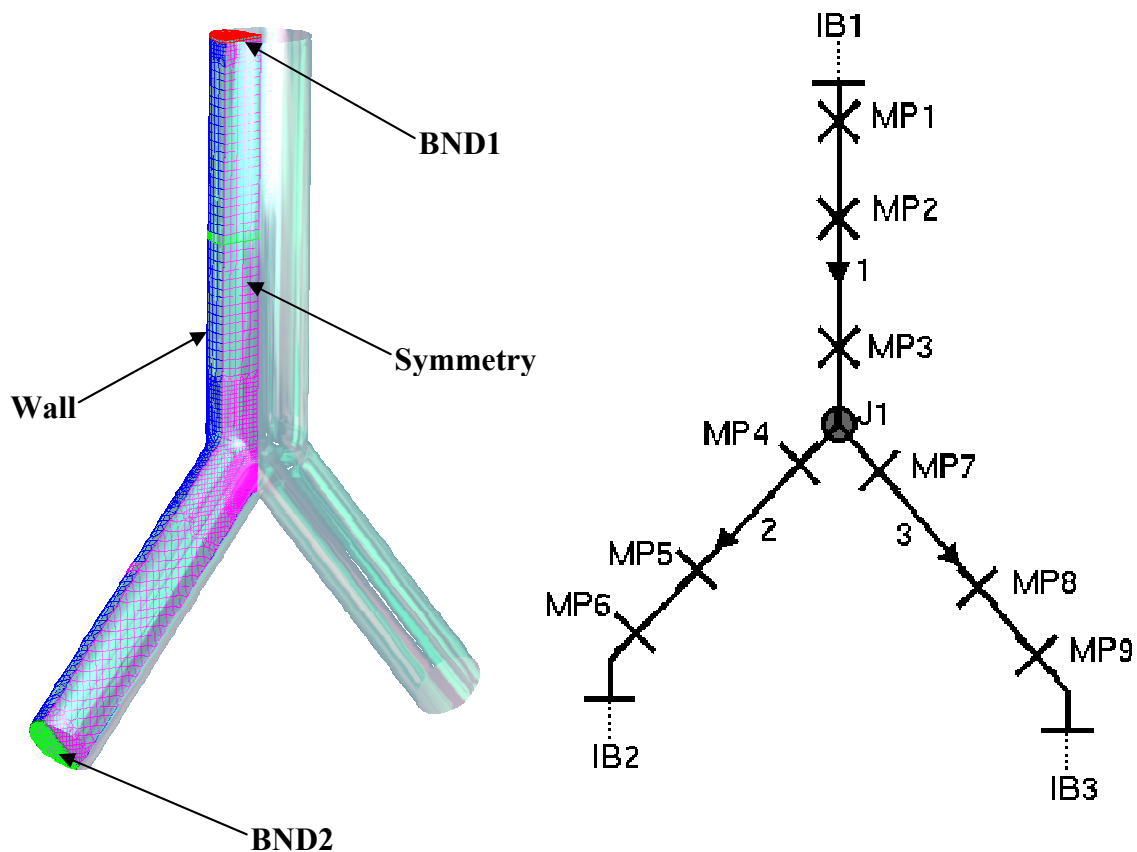


Abbildung 5-9: 3D- und 0D/1D-Modell des Y-Verteilers für die *Stoßwellenbeaufschlagung*

Die für alle mit dieser Methode untersuchten Geometrien gleich gewählten Werte der Drücke und Temperaturen an den Rändern gehen aus Tabelle 5-1 hervor.

BND1 / IB1		BND2 / IB2, IB3		Wall	
Stat. Druck	125.000 Pa	Stat. Druck	100.000 Pa	Temperatur	298,15 K
Temperatur	298,15 K	Temperatur	298,15 K		

Tabelle 5-1: *Randbedingungen der Stoßwellenbeaufschlagung*

Für die Initialisierung der Zellen im Inneren, werden die in Tabelle 5-2 angeführten Größen verwendet.

Initialisierung	
Statischer Druck	100.000 Pa
Temperatur	298,15 K
Dichte	1,17 kg/m ³

Tabelle 5-2: *Anfangsbedingungen der Stoßwellenbeaufschlagung*

In Abbildung 5-10 sind die Verläufe des statischen Druckes, über die Rohrlänge, zu verschiedenen Zeitpunkten zu sehen. Da der Fokus dieser Untersuchung auf die Ausbreitung der Druckwellen durch die jeweilige Geometrie und nicht auf deren Reflexion an den Rändern gerichtet ist, endet das betrachtete Zeitintervall noch bevor die Stoßwelle das Ende des Rohres

(BND2 bzw. IB2 und IB3) erreicht. Der Übergang vom Einlassrohr in den Runner1 bzw. den Runner2 ist im Diagramm als roter, vertikal verlaufender Balken angedeutet. Die durchgezogenen Kurven zeigen die Ergebnisse des 3D-Modells, während sich die gestrichelten Kurven auf das 0D/1D-Modell beziehen. Wie in Kapitel 3.1.1.5 erläutert, bietet AVL Boost mehrere Möglichkeiten eine Rohrverzweigung abzubilden. Für diese Untersuchung wurde neben einem Modell mit einer Refined-Model-Junction auch ein Modell mit einer Constant-Static-Pressure-Junction gerechnet. Da die Unterschiede marginal sind, wurde in Abbildung 5-10 nur das Ergebnis des erstgenannten Modells dargestellt.

Die in allen betrachteten Zeitschritten deutlich erkennbare, unterschiedliche Gestalt der von AVL Boost und AVL Fire gelieferten Druckwellen ist auf die unterschiedlichen numerischen Methoden, welcher sich diese beiden Programme bedienen, zurückzuführen. Im Gegensatz zur zeitlichen Veränderung der relativen Lage dieser Druckwellen zueinander, soll darauf allerdings nicht näher eingegangen werden. Betrachtet man die Schnittpunkte der beiden Kurven (0D/1D und 3D) so kann beim Übergang vom Einlassrohr in den Runner1 bzw. den Runner2 ein Sprung auf ein höheres Druckniveau festgestellt werden, während dieses Niveau vor und nach dem roten Balken einen näherungsweise konstanten Wert aufweist. Der Sprung erklärt sich durch einen etwas kürzeren Weg, welcher sich der Druckwelle im 3D-Modell bietet.

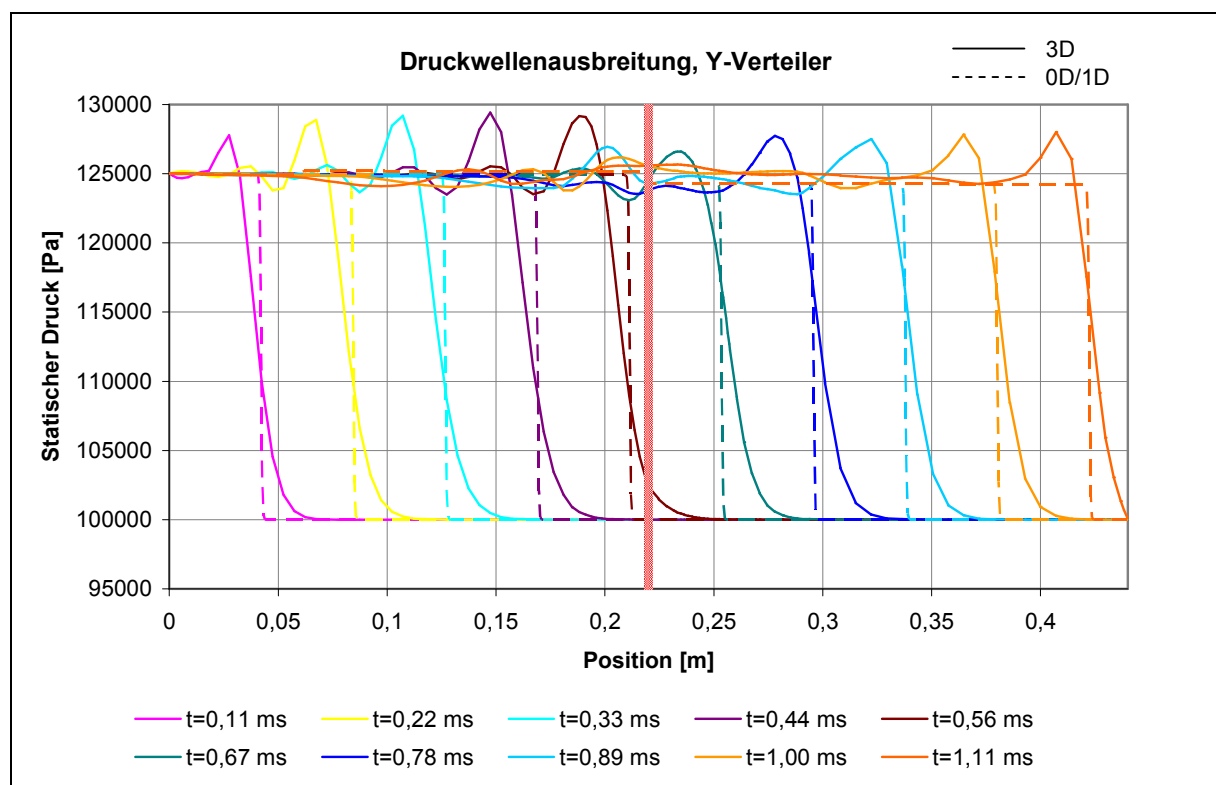


Abbildung 5-10: Druckwellenausbreitung im Y-Verteiler

5.3.2 Würfel-Verteiler

Für diese Geometrie wurde die Ausbreitung der Druckwellen sowohl im Einlassrohr als auch im Runner1 analysiert. In Abbildung 5-11 kann, abgesehen von der bereits in Kapitel 5.3.1 festgestellten, numerisch bedingt unterschiedlichen Form, eine nahezu gleiche Ausbreitung der Druckwellen im 0D/1D- und 3D-Modell erkannt werden. Die Ursache dafür liegt in der sehr guten 1D-Abbildbarkeit der 3D-Geometrie des Einlassrohres.

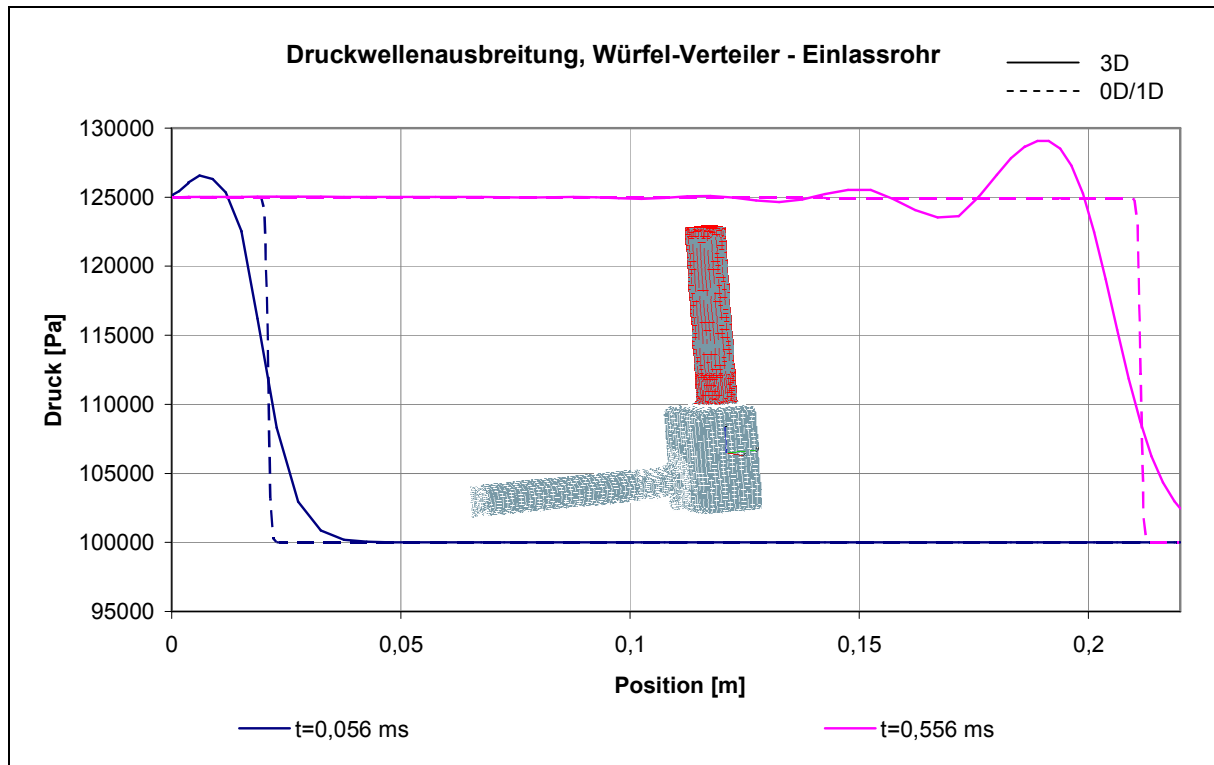


Abbildung 5-11: Druckwellenausbreitung im Einlassrohr des Würfel-Verteilers

Abbildung 5-12 stellt die Druckverläufe im Runner1 dar und zeigt neben der unterschiedlichen Gestalt auch eine Abweichung in der Lage der einander zeitlich entsprechenden Kurven. Die Begründung dafür liegt in der nulldimensionalen, also räumlich nicht aufgelösten, Beschreibung des zwischen Einlassrohr und Runner1 gelegenen Volumens im 0D/1D-Modell. Damit tritt die Druckwelle in diesem Modell unmittelbar nach dem Austritt aus dem Einlassrohr in den Runner1 ein, während sie im 3D-Modell eine gewisse Zeitdauer zum Durchqueren des dazwischen liegenden Volumens benötigt. Dieser Umstand erklärt auch, weshalb die Druckwelle des 0D/1D-Modells zum zweiten betrachteten Zeitpunkt ($t=0,833\text{ms}$) bereits knapp 100mm im Runner1 vorgedrungen ist, während die entsprechende Welle im 3D-Modell zu diesem Zeitpunkt gerade einmal die Rohröffnung erreicht hat.

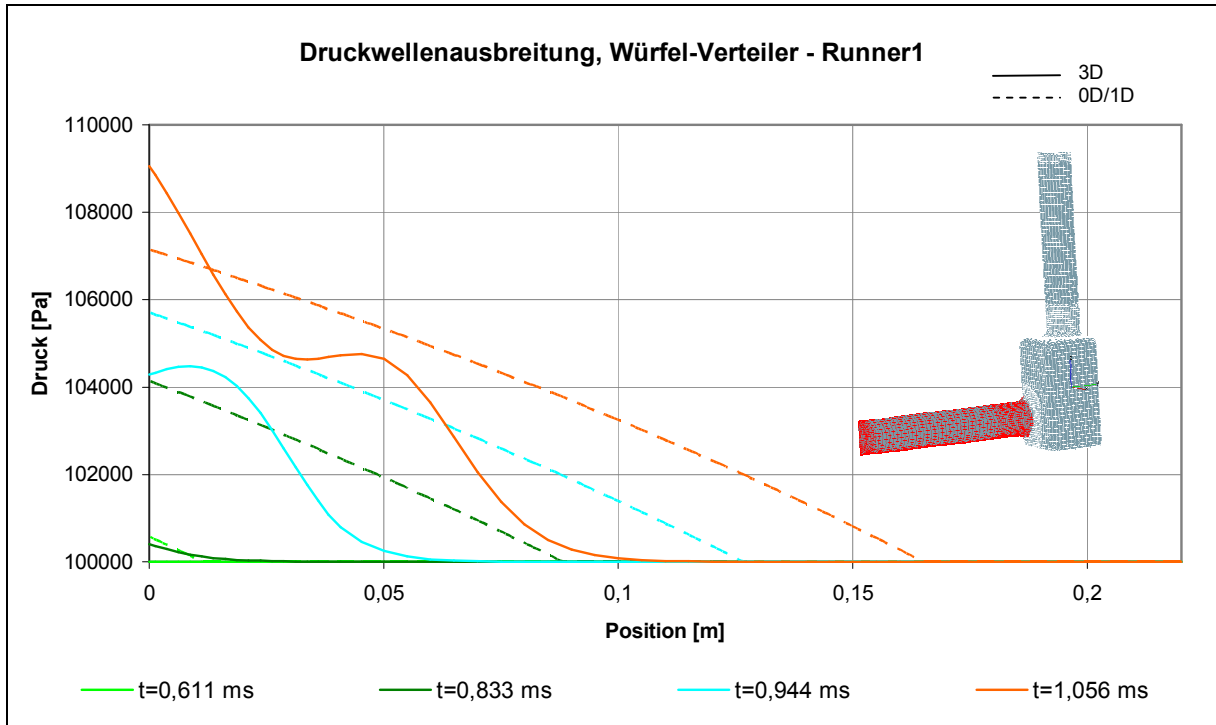


Abbildung 5-12: Druckwellenausbreitung im Runner1 des Würfel-Verteilers

5.3.3 804-V2

Da es bei der Geometrie 804-V2 keine eindeutigen Mittellinien gibt, entlang welcher man die Drücke analysieren könnte, wurde, wie in den in Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 integrierten Grafiken angedeutet, sowohl auf den Einlassquerschnitt als auch auf die Endquerschnitte der Runner zylindrische Rohre aufgesetzt. Innerhalb dieser wird nun, wie für die bereits betrachteten Geometrien, die Auswertung der Drücke durchgeführt.

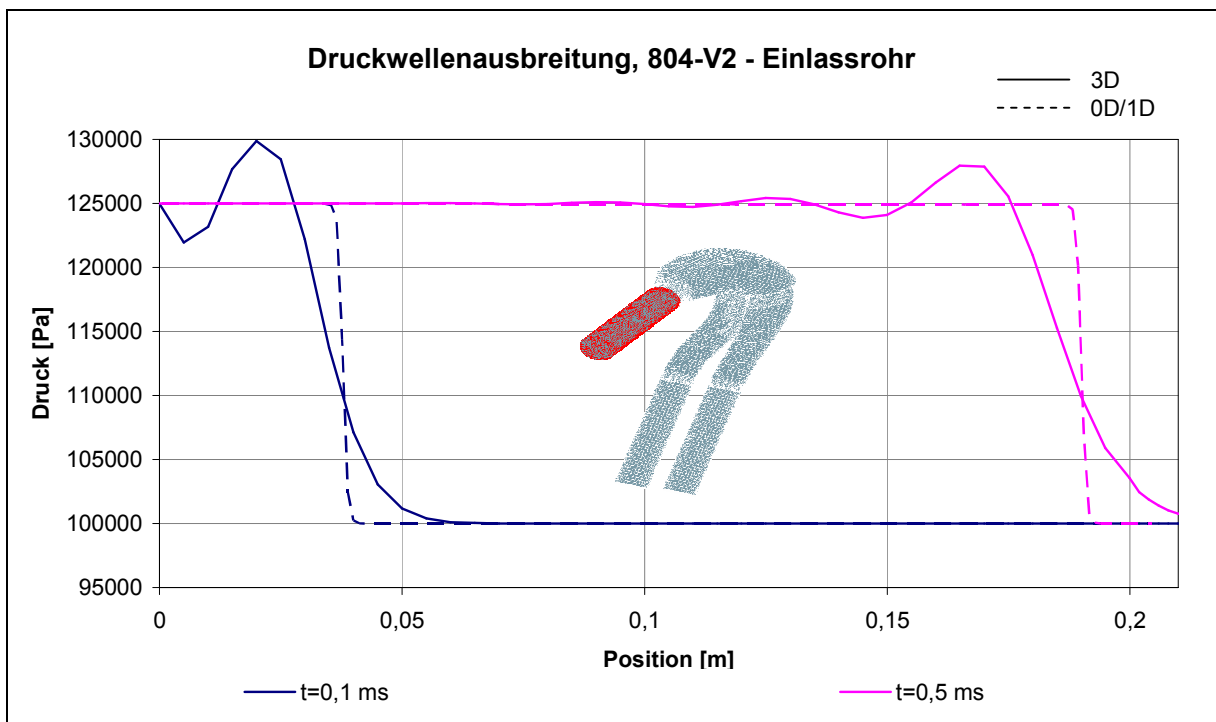


Abbildung 5-13: Druckwellenausbreitung im Einlassrohr der Geometrie 804-V2

Betrachtet man die Druckverläufe des Einlassrohres in Abbildung 5-13, so kann eine den entsprechenden Verläufen des Würfel-Verteilers recht ähnliche Gestalt erkannt werden. Bei den in Abbildung 5-14 dargestellten auf das Auslassrohr1 (zylindrische Verlängerung von Runner1) bezogenen Kurven ist wieder die, bereits im Runner1 des Würfel-Verteilers festgestellte, Verspätung der Druckwelle des 3D-Modells gegenüber jener des 0D/1D-Modells zu erkennen. Da die Druckwellen in beiden Auslassrohren ein sehr ähnliches Verhalten zeigen, werden hier nur die Ergebnisse für das Auslassrohr1 dargestellt.

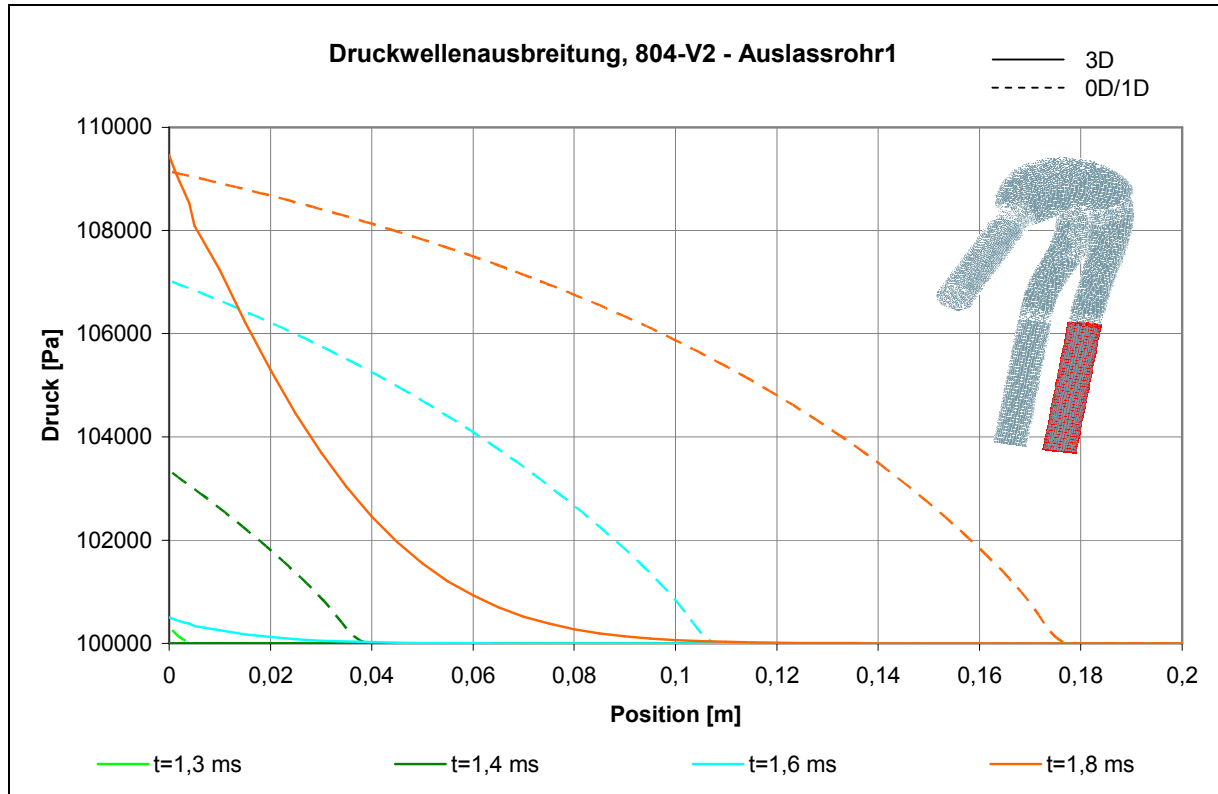


Abbildung 5-14: Druckwellenausbreitung im Auslassrohr1 der Geometrie 804-V2

5.3.4 Resümee zur Stoßwellenbeaufschlagung

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Methode der *Stoßwellenbeaufschlagung* eine wenig rechenintensive und damit sehr rasche Möglichkeit darstellt, den Fehler hinsichtlich der Laufzeit der Druckwellen, welcher sich bei der 0D/1D-Abbildung der Realgeometrie gegebenenfalls ergibt, abzuschätzen.

Der Einfluss dieser Laufzeitfehler auf die Abweichungen im Mitteldruck ist zweifelsohne vorhanden, allerdings begrenzt, wie sich aus dem Vergleich der Ergebnisse der *Stoßwellenbeaufschlagung* für den Würfel-Verteiler bzw. die Geometrie 804-V2 mit den entsprechenden Ergebnissen der Verifizierungsrechnungen in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 zeigt. Während die Laufzeitfehler für beide Geometrien ähnliche Werte aufweisen, ist die IMEP-Abweichung zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodell unter Verwendung von 804-V2 als Sekundärvolumen deutlich größer als jene, die sich beim Ersatz dieser Geometrie durch den Würfel-Verteiler ergibt. Damit ist klar, es gibt neben diesem Laufzeitfehler noch weitere potentielle Fehlerquellen bei der 0D/1D-Abbildung der Realgeometrie. Deren Erfassung ist das Ziel der in Kapitel 5.4 und 5.5 getesteten Methoden.

5.4 Harmonische Druckwellenbeaufschlagung

Vorrangiges Ziel dieser Methode war es, anders als bei der oben beschriebenen *Stoßwellenbeaufschlagung*, Randbedingungen zu verwenden, welche zu möglichst realitätsnahen Strömungszuständen führen. Des Weiteren sollte versucht werden, diese Randbedingungen nicht an typische motorische Größen, wie Last und Drehzahl zu knüpfen, sondern durch möglichst allgemeine physikalische Größen, wie Drücke und Frequenzen, zu beschreiben. Eine auf diese Art und Weise durchgeführte Untersuchung hätte den Vorteil, dass auch die damit erzielten Aussagen über die 0D/1D-Abbildungsmöglichkeit losgelöst von bestimmten Motorkonzepten (Zweitakt- oder Viertaktverfahren, Einzylinder- oder Mehrzylindermotor, ...) allgemeine Gültigkeit hätten.

Um herauszufinden, welche Gestalt und Größenordnung die Drücke an den Rändern der komplexen Geometrien im Luftpfad aufweisen, wurde zunächst einmal der Totaldruck an charakteristischen Stellen eines gekoppelten Modells ausgewertet. Dazu wurde das in Kapitel 4 näher beschriebene Modell *804_Koppelung_V2* verwendet. Da das 3D-Gebiet im Allgemeinen nicht größer als unbedingt erforderlich gewählt wird, können die Koppelstellen als Begrenzung der komplexen Geometrie und damit als geeignete Auswertestellen für die angesprochene Analyse betrachtet werden.

Die Druckverläufe am Einlass des Sekundär volumens, welche in Abbildung 5-15 exemplarisch für einige Drehzahlen dargestellt sind, besitzen näherungsweise harmonische Gestalt. Damit erscheint, für die hier vorgestellte Methode, die Vorgabe eines zeitlich sinusförmig schwankenden Totaldruckes als Einlassrandbedingung naheliegend.

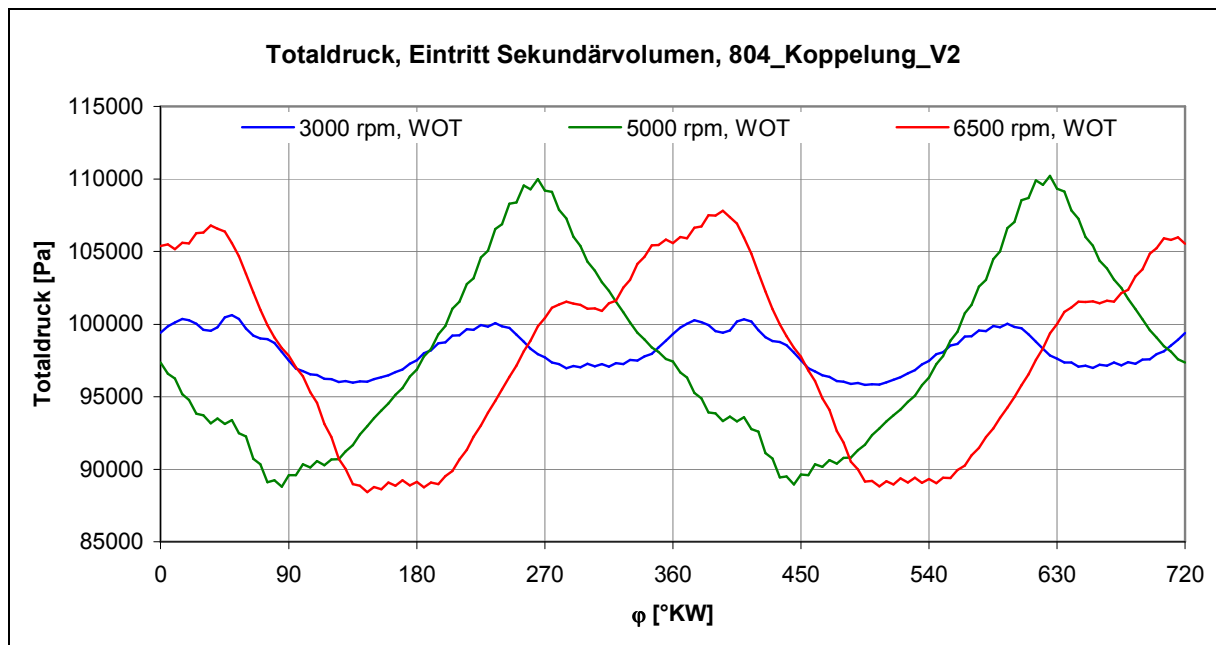


Abbildung 5-15: Totaldruck am Einlass des Sekundär volumens

Nun gilt es die für den motorischen Betrieb relevanten Amplituden und Frequenzen dieser Totaldruckfunktionen zu finden. Dazu werden die Totaldruckverläufe an den charakteristischen Stellen für sämtliche Drehzahlen (es wurden nur Volllastpunkte

herangezogen) ausgewertet und einer Fourier-Analyse zugeführt. Mit den daraus erhaltenen Ergebnissen können die in Kapitel 5.4.1.1 angeführten Randbedingungen formuliert werden.

Natürlich stünden im Falle der Anwendung der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung* zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit keine Ergebnisse einer gekoppelten Rechnung zur Verfügung. Wie sich allerdings bei der Fourier-Analyse der angesprochenen Totaldruckverläufe gezeigt hat, entsprechen die entscheidenden Frequenzen jenen, durch die Drehzahl und die Zylinderzahl festgelegten, mit denen die Ansaugvorgänge des Motors auftreten. Bei einem Zweizylinder-Viertaktmotor wären dies, die den Drehzahlen entsprechenden Frequenzen. Selbstverständlich treten auch höherfrequente Druckschwankungen auf. Allerdings nur in Kombination mit relativ kleinen Amplituden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Test, welcher das grundsätzliche Potential dieser Methode abschätzen soll, macht es aber dennoch Sinn die für das bewertete Motorkonzept relevanten Frequenzen und Amplituden, als Eingangsgrößen dieser Methode, möglichst exakt anzugeben.

Wie bereits bei der *Stoßwellenbeaufschlagung*, wird auch hier anhand des Y-Verteilers die Vorgehensweise genau erläutert, während für die im Weiteren betrachteten Geometrien, neben den Ergebnissen, nur mehr die essentiellen Informationen angeführt werden.

5.4.1 Y-Verteiler

In den Kapiteln 5.4.1.1, 5.4.1.2 und 5.4.1.3 wird die Wahl der Randbedingungen erklärt. Kapitel 5.4.1.4 zeigt die damit für den Y-Verteiler berechneten Ergebnisse.

5.4.1.1 3D-Modell

Da die Randbedingungen dieselben Symmetrieebenen besitzen, wie die Geometrie, können diese, wie bereits in Kapitel 5.3 beschrieben, genutzt werden. Wie in Abbildung 5-16 zu sehen ist, besitzt das Modell neben den beiden Einlass/Auslass-Randbedingungen, eine Wand-Randbedingung über welche die Außentemperatur konstant gehalten wird und die, bereits aus Kapitel 5.3 bekannte, Symmetrie-Randbedingung.

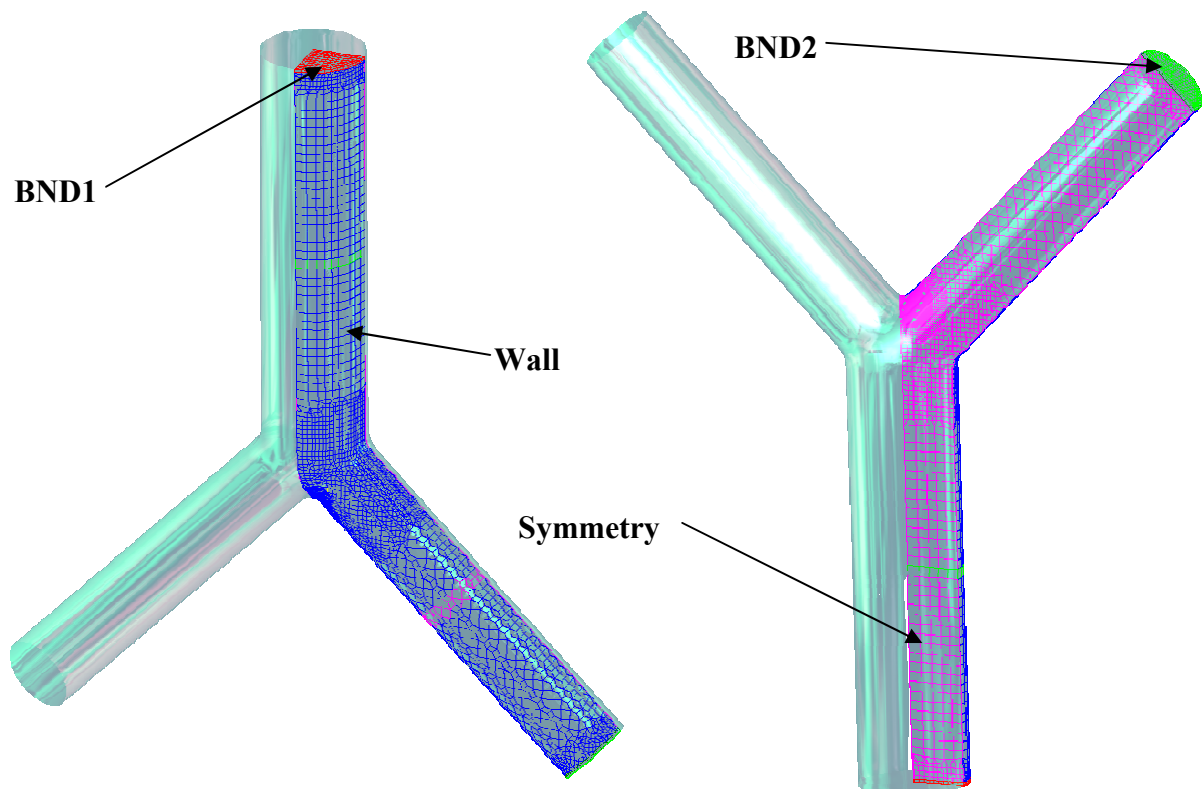


Abbildung 5-16: 3D-Modell des Y-Verteilers für die *Harmonische Druckwellenbeaufschlagung*

Entsprechend Tabelle 5-3, wurde über die Randbedingung BND1 neben einem, nach (23), über die Zeit sinusförmig schwankenden Gesamtdruck eine konstante Temperatur vorgegeben.

BND1		BND2		Wall	
Totaldruck	$P_{1,tot}$	Totaldruck	100.000 Pa	Temperatur	298,15 K
Temperatur	298,15 K				

Tabelle 5-3: Randbedingungen der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*

$$p_{1,tot} = 100.000 + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (23)$$

Tabelle 5-4 zeigt die unterschiedlichen auf die Randbedingung BND1 bezogenen Kombinationen aus Frequenz und Gesamtdruckamplitude.

Frequenz [Hz]	Amplitude [Pa]
50	13.000
75	13.000
100	26.000
150	13.000

Tabelle 5-4: Parameter der Totaldruckfunktion in BND1

Da in den Rändern die Geschwindigkeitsvektoren, deren Richtungen normal zu den Ein- bzw. Austrittsflächen definiert wurden, ihre Vorzeichen während eines Zyklus ändern, es damit sowohl in BND1 als auch in BND2 zu Ein- und Ausströmvorgängen kommt, musste auch der Druck auf der gegenüberliegenden Seite (BND2) als Totaldruck formuliert werden. Die üblicherweise bevorzugte Methode, auf der einen Seite einen Totaldruck und auf der anderen einen statischen Druck vorzugeben, führte zum Divergieren der Rechnung. Die Wahl von Randbedingungen, die ein weniger dynamisches Verhalten in den Rändern nach sich ziehen würden, kommt nicht in Frage, da es auch bei der Motorprozessrechnung, an den betreffenden Positionen, zu Strömungen in beide Richtungen kommt.

5.4.1.2 0D/1D-Modell

Da mit Hilfe der Internal Boundaries, wie in Kapitel 3.1.1.3 beschrieben, nur statische Drücke und Temperaturen vorgegeben werden können, ist es nicht möglich im 0D/1D-Modell dieselben Randbedingungen wie im 3D-Modell zu wählen. Daher muss zunächst die 3D-Rechnung durchgeführt werden. Anschließend wird, wie in Abbildung 5-17 angedeutet, an ausgewählten Zellschichten, der statische Druck und die Temperatur ausgewertet und in den entsprechenden Internal Boundaries im 0D/1D-Modell als Randbedingung verwendet.

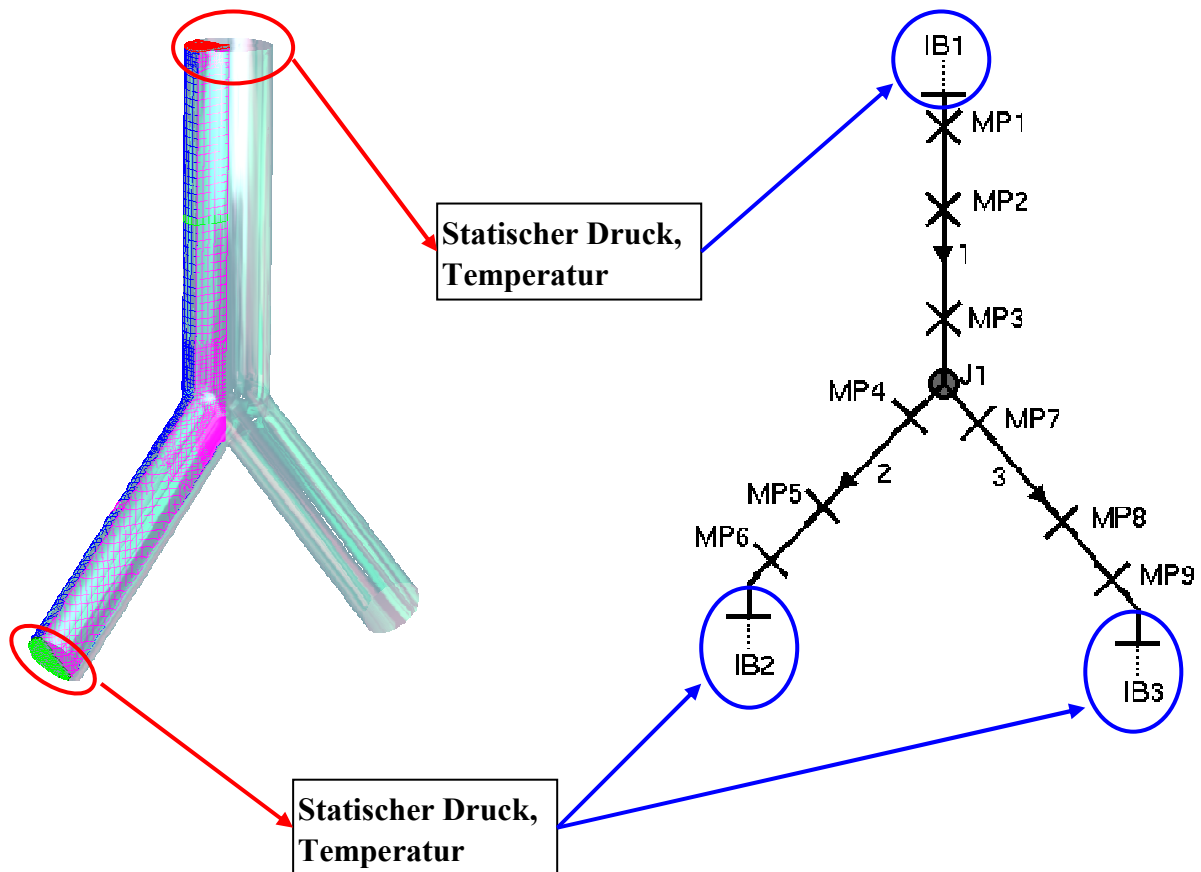


Abbildung 5-17: Randbedingungs-Übergabe bei der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*

5.4.1.3 Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe

Nachdem, wie im Kapitel 5.4.1.2 beschrieben, im 0D/1D-Modell nicht exakt dieselben Randbedingungen wie im 3D-Modell gewählt werden konnten, sollte anhand einer einfachen Rechnung überprüft werden, ob die statt dessen, entsprechend der in Kapitel 5.4.1.2 erklärten Vorgehensweise, gewählten 0D/1D-Randbedingungen das Potential haben, denselben Strömungszustand wie im 3D-Modell hervorzurufen. Selbstverständlich kann ein gleiches Strömungsfeld, auch bei gleichen Randbedingungen, nur dann erwartet werden, wenn das 0D/1D-Modell in der Lage ist das 3D-Modell exakt nachzubilden. Aus diesem Grund wurde als Test-Objekt, wie in Abbildung 5-18 zu sehen, ein gerades Rohr, also eine Geometrie die sehr gut eindimensional abgebildet werden kann, gewählt. Wendet man nun die oben erläuterte *Harmonische Druckwellenbeaufschlagung* auf diese Geometrie an, wäre im Falle abweichender Ergebnisse zwischen 0D/1D- und 3D-Modell die Übergabe der Randbedingungen die einzig mögliche Ursache dafür. Konkret wurde dieser Test für die erste in Tabelle 5-4 aufgelistete Randbedingung durchgeführt. Ausgewertet wurde sowohl der

Massenstrom als auch der statische Druck in der Mitte des Rohres. Wie zu sehen ist, wurden für das Boost-Modell zwei Rechnungen durchgeführt. Zunächst wurden die statischen Drücke bzw. Temperaturen der äußeren Zellselktionen des 3D-Modells verwendet, anschließend dieselben Größen, der etwas nach innen versetzten Selektionen (siehe Abbildung 5-18). Natürlich wurde die Rohrlänge im 0D/1D-Modell entsprechend angepasst.

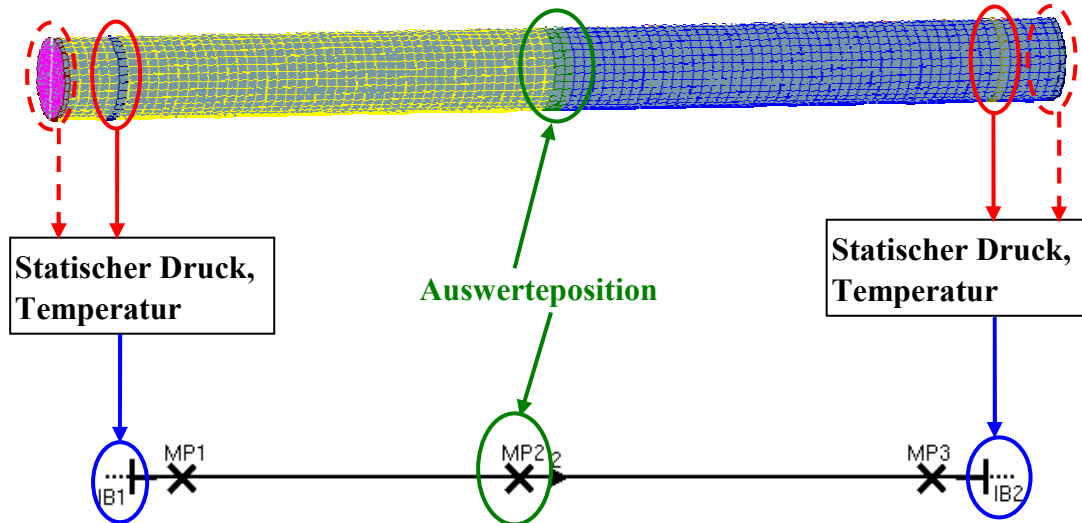


Abbildung 5-18: Modelle zur Verifizierung der Randbedingungsübergabe

Wie aus Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 hervorgeht, stimmen die Verläufe zwischen 3D-Modell und jenem 0D/1D-Modell, welches als Randbedingungen die Größen aus den inneren Zellselktionen verwendet, sowohl hinsichtlich des Massenstroms als auch des statischen Druckes gut überein, weshalb die entsprechende Übergabemethode positiv zu bewerten ist. Auf Grund der größeren Abweichungen des anderen 0D/1D-Modells, wird von einer Übergabe der Größen in den äußeren Zellschichten Abstand genommen.

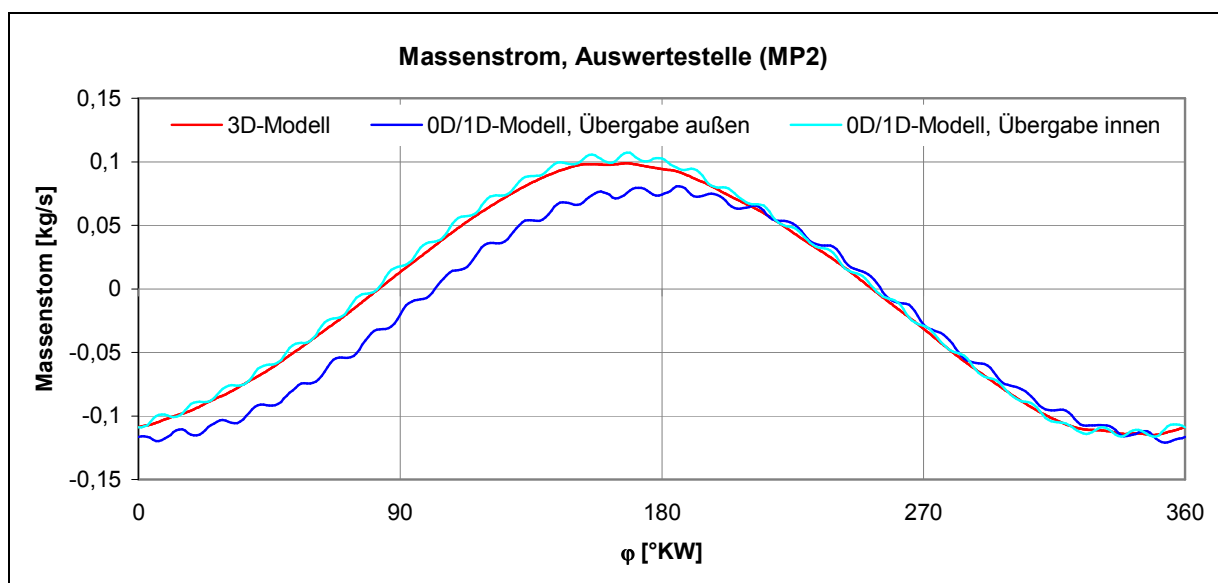


Abbildung 5-19: Massenströme an Auswerteposition, Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe

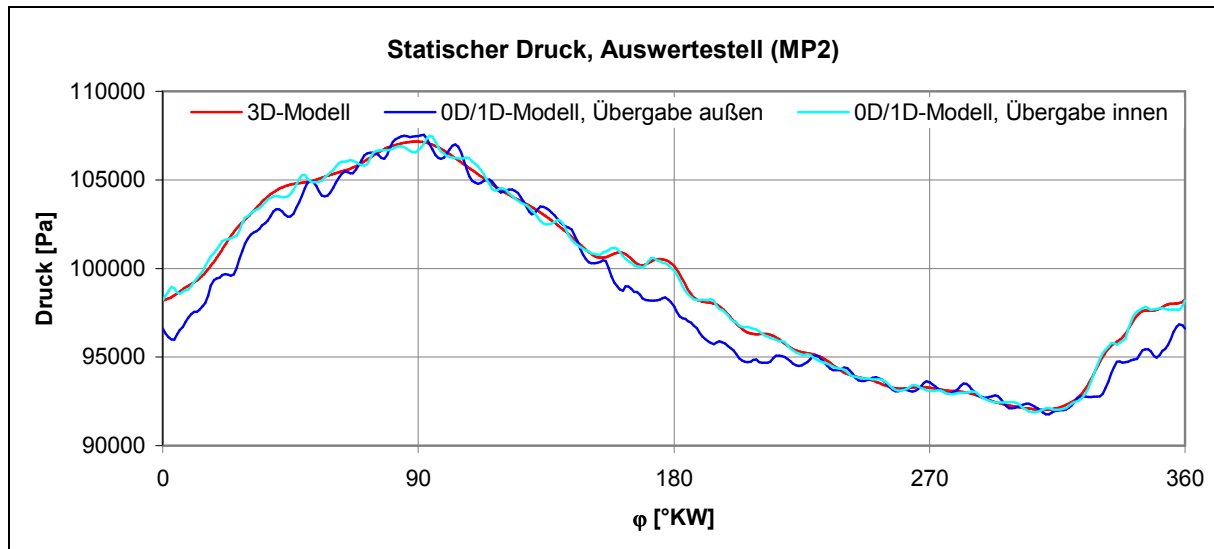


Abbildung 5-20: Statische Drücke an Auswerteposition, Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe

5.4.1.4 Auswertung

Bei den Überlegungen zu der hier beschriebenen Auswertemethode, wurde eine weitgehende Neutralisierung der Absolutwerte der Totaldruckamplituden angestrebt. Dieses Ziel ergibt sich auf Grund der eingangs erwähnten, nicht ganz trivial und damit auch nicht immer exakt ermittelbaren Werte für diese Größe.

Die gewählte, in Abbildung 5-21 angedeutete, Vorgehensweise sieht zunächst die Auswertung der Totaldruckverläufe an geeigneten Zellsektionen des 3D-Modells und in den entsprechenden Messpunkten des 0D/1D-Modells vor. Anschließend werden die damit gewonnenen Verläufe einer Fourier-Analyse unterzogen. Aus den auf diese Art und Weise erhaltenen Kombinationen aus Frequenz und Totaldruckamplitude wird jene Kombination ausgewählt deren Frequenz der Beaufschlagungsfrequenz entspricht. Für den ersten untersuchten Fall, dessen Beaufschlagungsfrequenz in Tabelle 5-4 angeführt ist, bedeutete dies beispielsweise, dass nur die mit einer Frequenz von 50Hz auftretenden Totaldruckamplituden betrachtet werden. Es ergibt sich also für jede durchgeführte Rechnung und damit für jede untersuchte Frequenz in jeder der oben erwähnten Zellsektionen bzw. Messpunkten ein Wert für die Totaldruckamplitude. Berechnet man den Quotienten aus diesen Werten, erhält man Größen, die im Weiteren als Übertragungsfaktoren bezeichnet und zum Vergleich zwischen 0D/1D- und 3D-Modell herangezogen werden. Ein solcher Vergleich ist in Abbildung 5-22 zu sehen. Wie bereits bei der Bewertung des Y-Verteilers mit Hilfe der *Stoßwellenbeaufschlagung*, wurden auch hier zwei 0D/1D-Modelle untersucht, welche sich lediglich in der Abbildung der Rohrverzweigung unterscheiden.

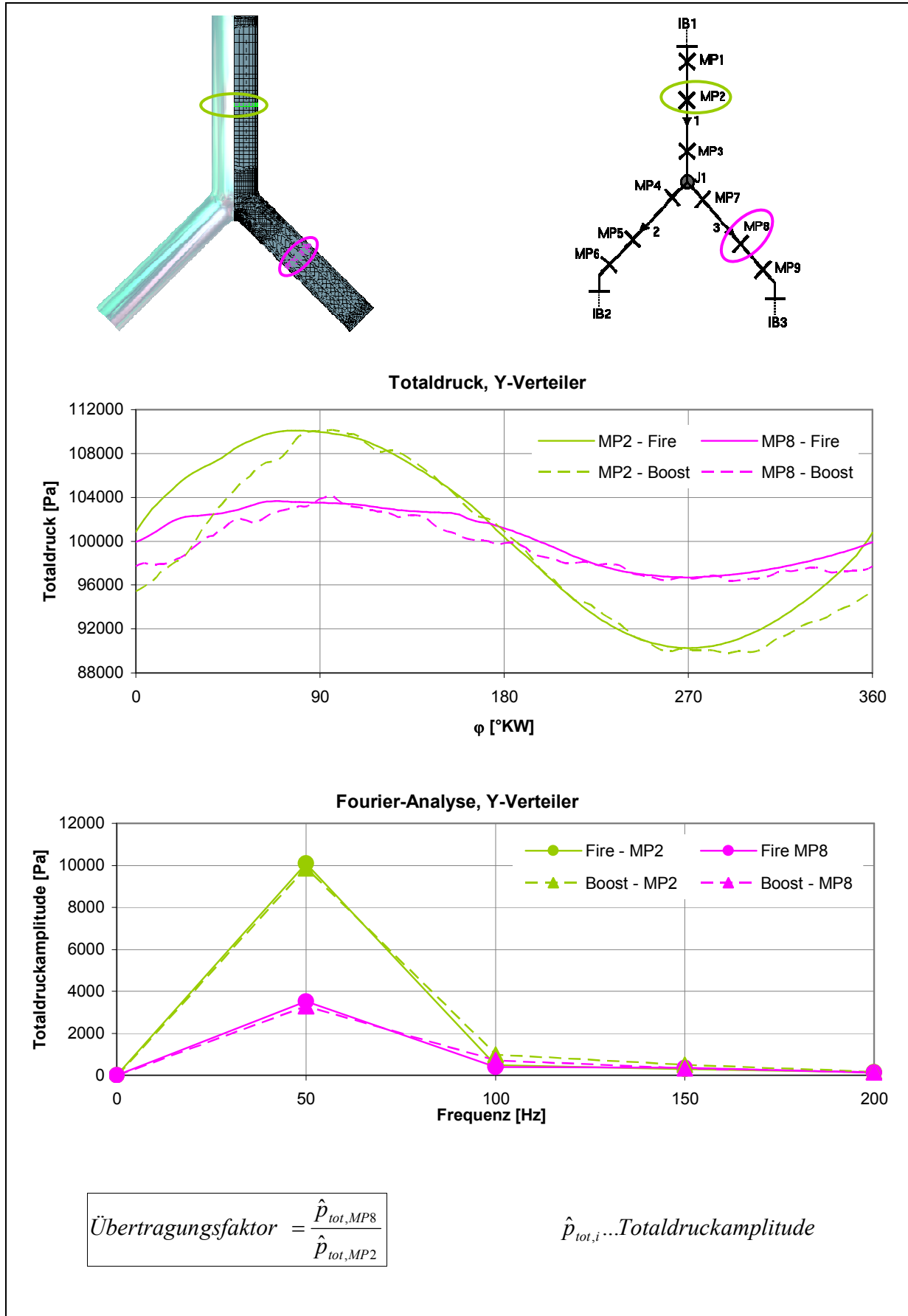


Abbildung 5-21: Auswertung Harmonische Druckwellenbeaufschlagung

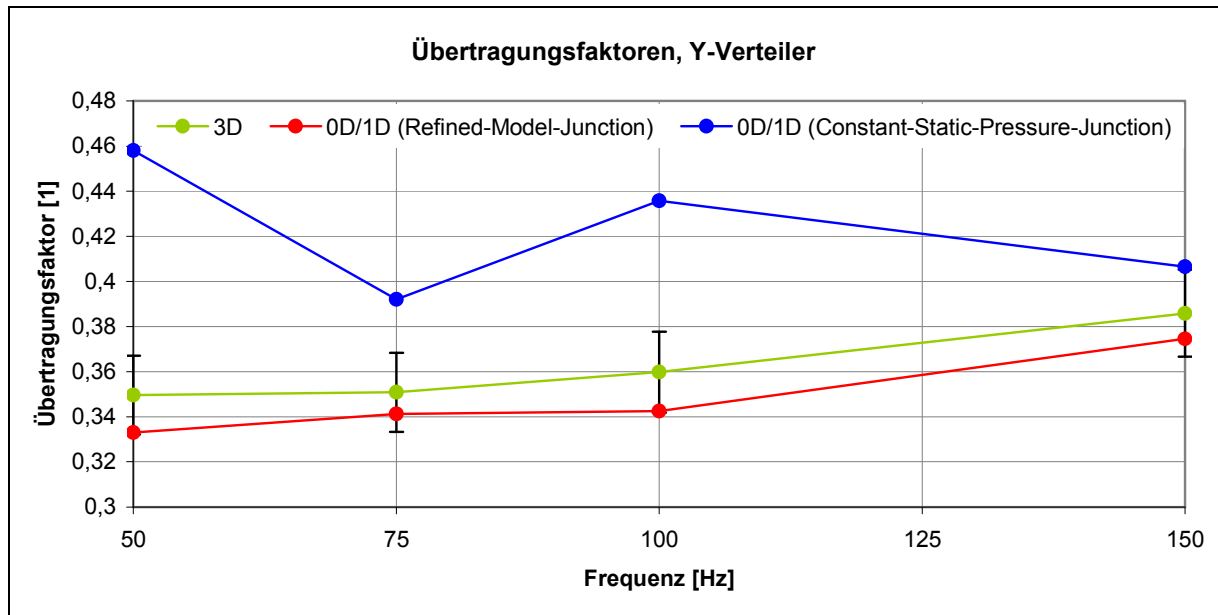


Abbildung 5-22: Übertragungsfaktoren des Y-Verteilers

Bei Betrachtung der, auf die Übertragungsfaktoren des 3D-Modells bezogenen, 5%-Fehlerindikatoren kann eine innerhalb dieses Bereiches liegende Abweichung der Übertragungsfaktoren jenes 0D/1D-Modells erkannt werden, welches die Refined-Model-Junction verwendet, also die Winkel zwischen den einzelnen Rohren des Verteilers berücksichtigt. Ersetzt man nun im 0D/1D-Modell die Refined-Model-Junction durch eine Constant-Static-Pressure-Junction, weichen die Übertragungsfaktoren deutlich stärker von jenen des 3D-Modells ab. Für den Fall, dass sich die hier getestete Methode tatsächlich zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit eignet, müsste ein 0D/1D-Motormodell, welches den Y-Verteiler als Sekundärvolumen verwendet und diesen mit einer Refined-Model-Junction abbildet eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit dem gekoppelten 1D/3D-Motormodell (3D-Geometrie des Y-Verteilers wird exakt abgebildet) liefern als dasselbe 0D/1D-Motormodell, welches anstatt der Refined-Model-Junction eine Constant-Static-Pressure-Junction verwendet. Wie die Ergebnisse der Verifizierungsrechnungen in Kapitel 5.2.1 zeigen, ist dies allerdings nicht der Fall. Die in Abbildung 5-5 dargestellten Mitteldruckverläufe zeigen im unteren Drehzahlbereich kaum Unterschiede zwischen den beiden 0D/1D-Modellen. Im mittleren Drehzahlbereich zeigt sogar das Modell mit der Constant-Static-Pressure-Junction eine bessere Annäherung an das gekoppelte Modell. Lediglich ab 6000 1/min weist die Verwendung der Refined-Model-Junction Vorteile auf.

5.4.2 Würfel-Verteiler

Abbildung 5-23 - links zeigt das zur Untersuchung dieser Geometrie verwendete 3D-Modell. Wie zu sehen ist, werden ähnlich wie bei der Modellierung des Y-Verteilers die Symmetrien vollständig ausgenutzt. In Abbildung 5-23 - rechts ist das zugehörige 0D/1D-Modell dargestellt.

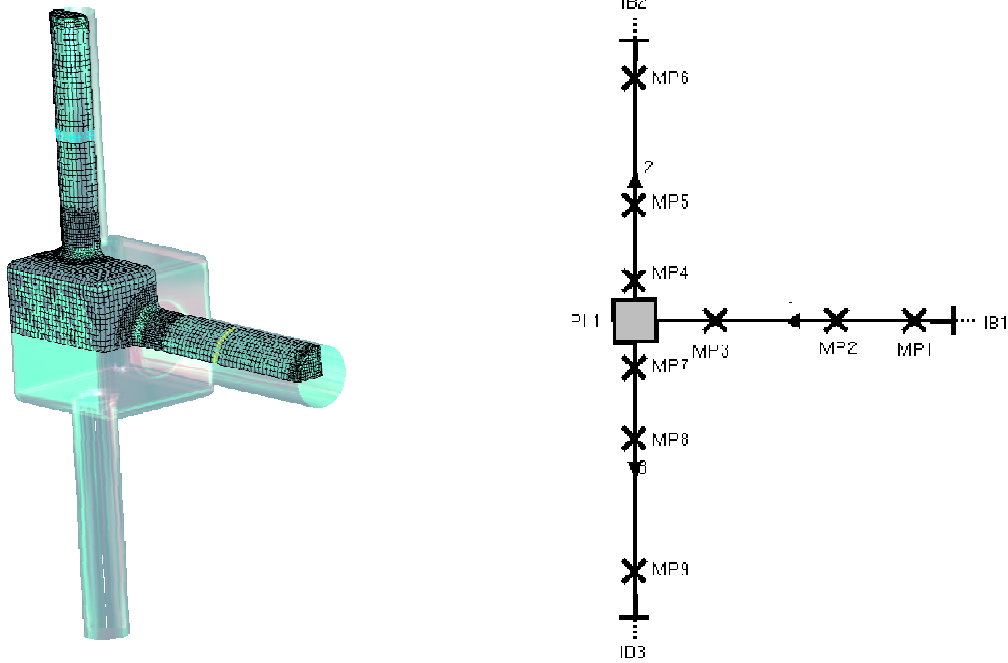


Abbildung 5-23: 3D- und 0D/1D-Modell des Würfel-Verteilers, Harm. Druckwellenbeaufschlagung

Aus Abbildung 5-24 können die Abweichungen der Übertragungsfaktoren zwischen 0D/1D- und 3D-Modell erkannt werden, welche geringfügig größer sind, als jene des Y-Verteilers. Zur Orientierung sind auch hier wieder 5%-Fehlerindikatoren dargestellt.

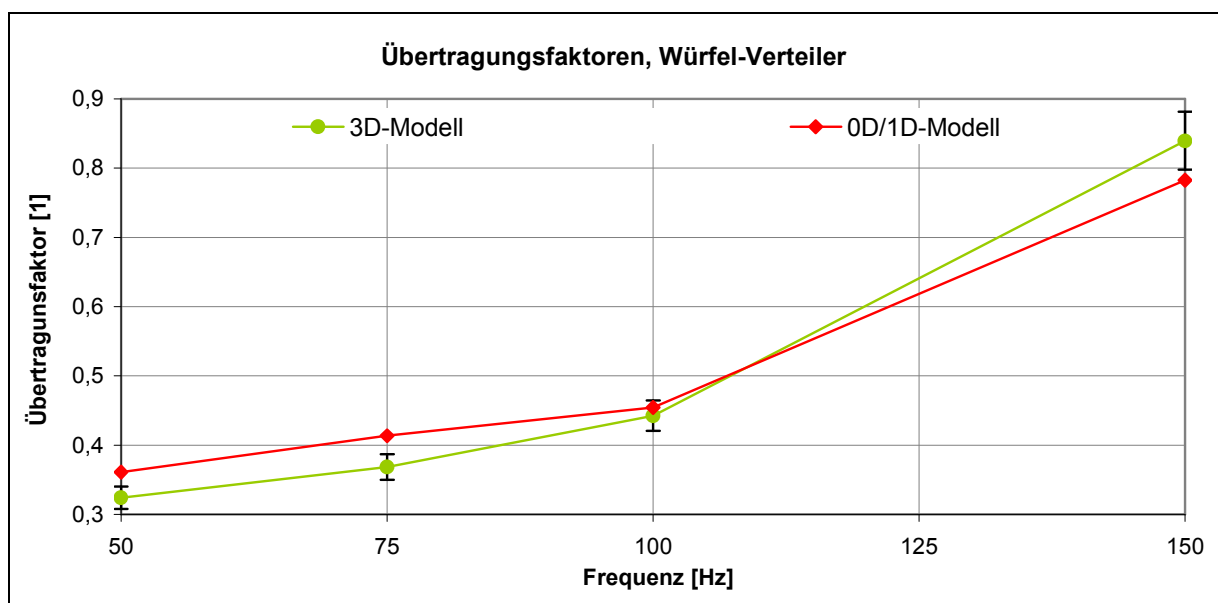


Abbildung 5-24: Übertragungsfaktoren des Würfel-Verteilers

Da, wie Kapitel 5.2.2 entnommen werden kann, auch die Abweichungen zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodell in der Größenordnung der entsprechenden Werte des Y-Verteilers liegen, bringt die Untersuchung dieser Geometrie keine weiteren Aufschlüsse bezüglich der Aussagekraft der getesteten Methode. Um zu sehen, ob größere Abweichungen der Motormodelle (0D/1D vs. gekoppelt) mit größeren Abweichungen der Übertragungsfaktoren einhergehen, wird im nächsten Punkt das Sekundärvolumen der 804-Zweivolumentvariante untersucht.

5.4.3 804-V2

Da für diese Geometrie, auf Grund der komplexen Formgebung, keine eindeutige Zuordnung von Zellsektionen des 3D-Modells zu Messpunkten des 1D-Modells möglich ist, wurde die ursprüngliche Geometrie, wie in Abbildung 5-25 - links zu sehen, am Einlass sowie an den Enden der Runner um zylindrische Rohre verlängert. Diese Rohre können im 0D/1D-Modell (siehe Abbildung 5-25 - rechts) exakt nachgebildet werden, wodurch auch Zellsektionen des 3D-Rohres durch Messpunkte in den entsprechenden Rohren des 0D/1D-Modells abgebildet werden können. Mit dieser modifizierten Geometrie wäre die bereits aus 5.4.1 und 5.4.2 bekannte Vorgehensweise grundsätzlich möglich.

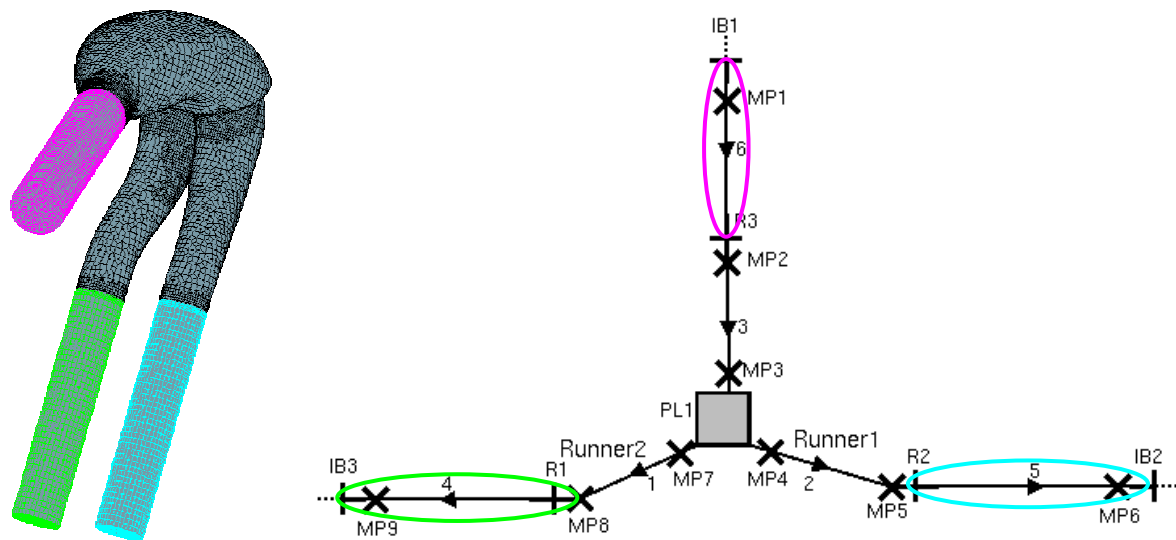


Abbildung 5-25: 3D- bzw. 0D/1D-Modell der Geometrie 804-V2, *Harm. Druckwellenbeaufschlagung*

Bei der Analyse der vom 0D/1D-Modell gelieferten Massenströme am Einlass des Sekundärvolumens (MP1), welche zur Beurteilung des Einschwingzustandes betrachtet wurden, mussten allerdings, wie in Abbildung 5-26 zu sehen, derart gravierende Abweichungen vom 3D-Modell festgestellt werden, dass eine weitere Auswertung sinnlos erscheint.

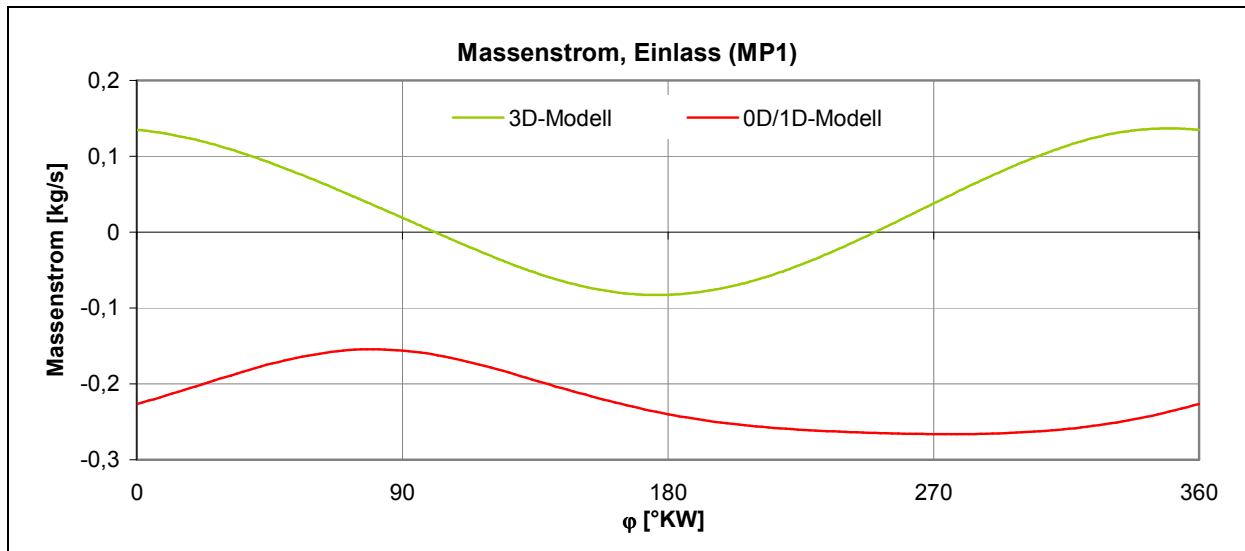


Abbildung 5-26: Einlassmassenstrom der 804-V2-Modelle im letzten gerechneten Zyklus

Der zu diesen starken Abweichungen führende, vollständig im negativen Bereich liegende Massenstrom des 0D/1D-Modells stellt sich, wie Abbildung 5-27 zu entnehmen ist, erst nach etwa zehn gerechneten Zyklen ein.

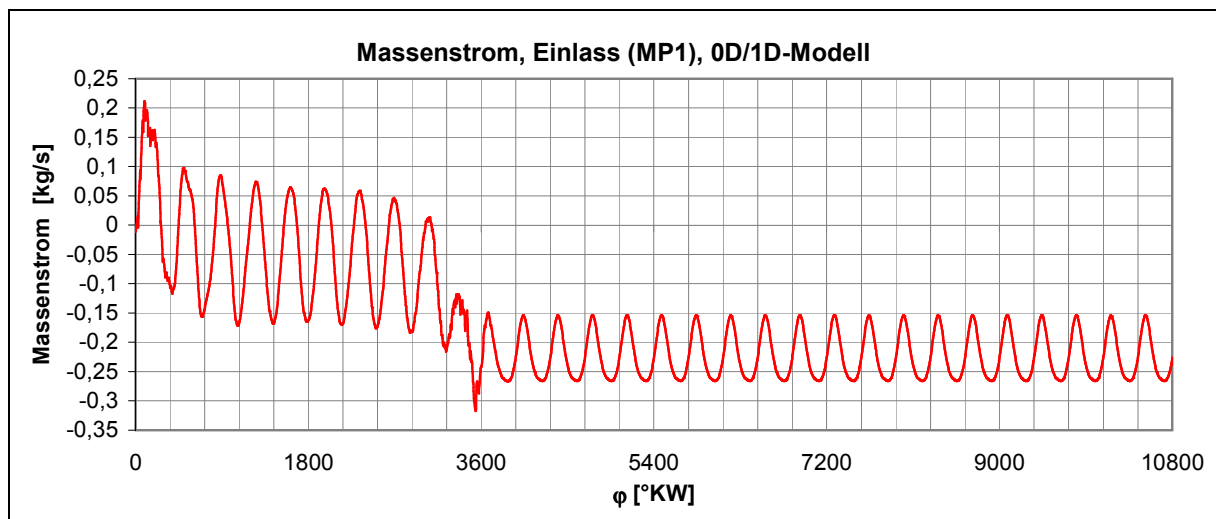


Abbildung 5-27: Einlassmassenstrom der 804-V2-Modelle über alle 30 gerechneten Zyklen

Wie sich bei der Variation verschiedenster Parameter des in Abbildung 5-25 - rechts dargestellten 0D/1D-Modells herausgestellt hat, kann diese, für die großen Abweichungen ursächliche, sich nach wenigen Zyklen abrupt ändernde Eigenschaft der Strömungsgrößen durch Verwendung ausschließlich zylindrischer Rohre vermieden werden. Diese Tatsache wird durch die Geometrie 804-V2*, deren Untersuchung im nächsten Kapitel beschrieben wird, genutzt.

5.4.4 804-V2*

Wie bereits in Kapitel 5.4.3 festgestellt, kann durch die Verwendung zylindrischer Runner und der damit einhergehenden Vermeidung konischer Rohre im gesamten 0D/1D-Modell eine zumindest qualitative Übereinstimmung zwischen den 0D/1D- und den 3D-Ergebnissen und damit die Voraussetzung für eine genauere Untersuchung mit Hilfe der *Harmonischen*

Druckwellenbeaufschlagung erreicht werden. Alle anderen Parameter des in Abbildung 5-28 - rechts dargestellten 0D/1D-Modells bleiben unverändert. Selbstverständlich wurde, wie in Abbildung 5-28 - links zu sehen ist, auch das 3D-Modell insofern verändert, als dass die Runner nun konstante Durchmesser aufweisen. Da die Auswirkungen dieser Modifikation auf die Ergebnisse des gekoppelten Motormodells, wie in Kapitel 5.2.4 gezeigt, relativ gering sind, sollte eine mit 804-V2* erzielte Aussage zumindest in ihren Tendenzen auch auf die Geometrie 804_V2 übertragen werden können.

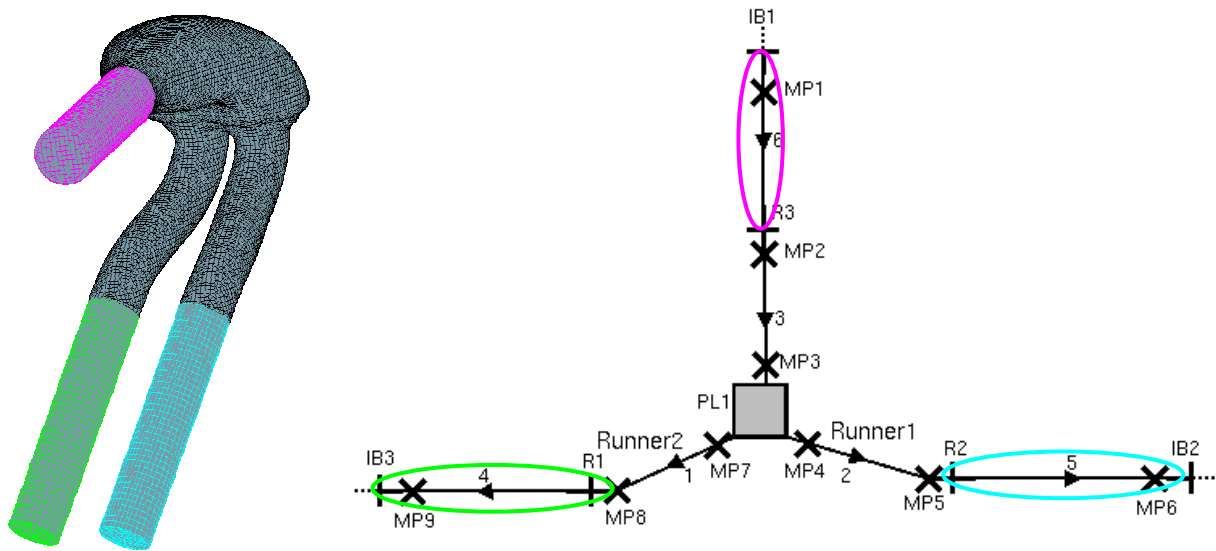


Abbildung 5-28: 3D- bzw. 0D/1D-Modell der Geometrie 804-V2*, Harm. Druckwellenbeaufschlagung

Betrachtet man die in Abbildung 5-29 dargestellten Ergebnisse, fällt zunächst einmal eine bei 150Hz auftretende Abweichung der Übertragungsfaktoren zwischen 0D/1D-Modell und 3D-Modell auf, welche eine Größenordnung über der für die bisher bewerteten Geometrien liegt. Des Weiteren sind bei 150Hz auch die Absolutwerte der Übertragungsfaktoren - sowohl die des 0D/1D- als auch jene des 3D-Modells - auf einem deutlich höheren Niveau zu finden, als bei den anderen untersuchten Frequenzen.

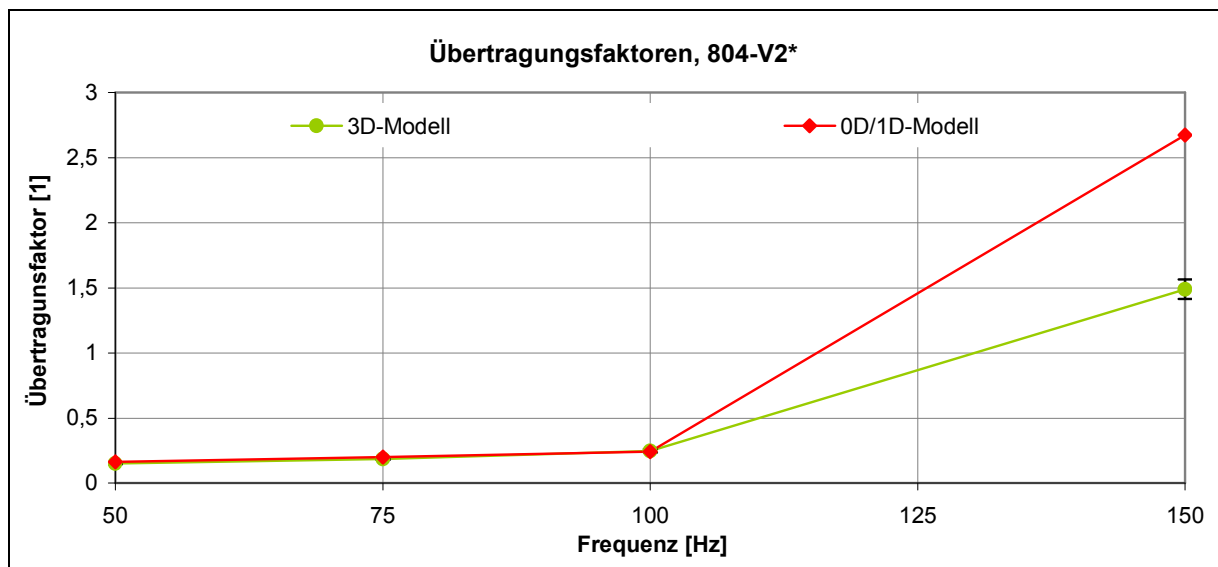


Abbildung 5-29: Übertragungsfaktoren 804-V2*, alle berechneten Frequenzen

Nicht nur das höhere Niveau an sich, auch die Tatsache, dass die Übertragungsfaktoren nur bei dieser Frequenz größer, bei allen anderen untersuchten Frequenzen allerdings kleiner als eins sind, lässt eine nähere Betrachtung der 150Hz-Rechnung sinnvoll erscheinen. Im Zuge der Analyse sämtlicher Zwischenergebnisse wurden auch die in Abbildung 5-30 dargestellten, im 3D-Modell ausgewerteten und im 0D/1D-Modell als Randbedingungen aufgebrauchten, Verläufe des statischen Druckes festgestellt. Diese unterstreichen, dass die 150Hz-Randbedingung- verglichen mit den niederfrequenteren - bereits im 3D-Modell zu deutlich anderen Ergebnissen führt.

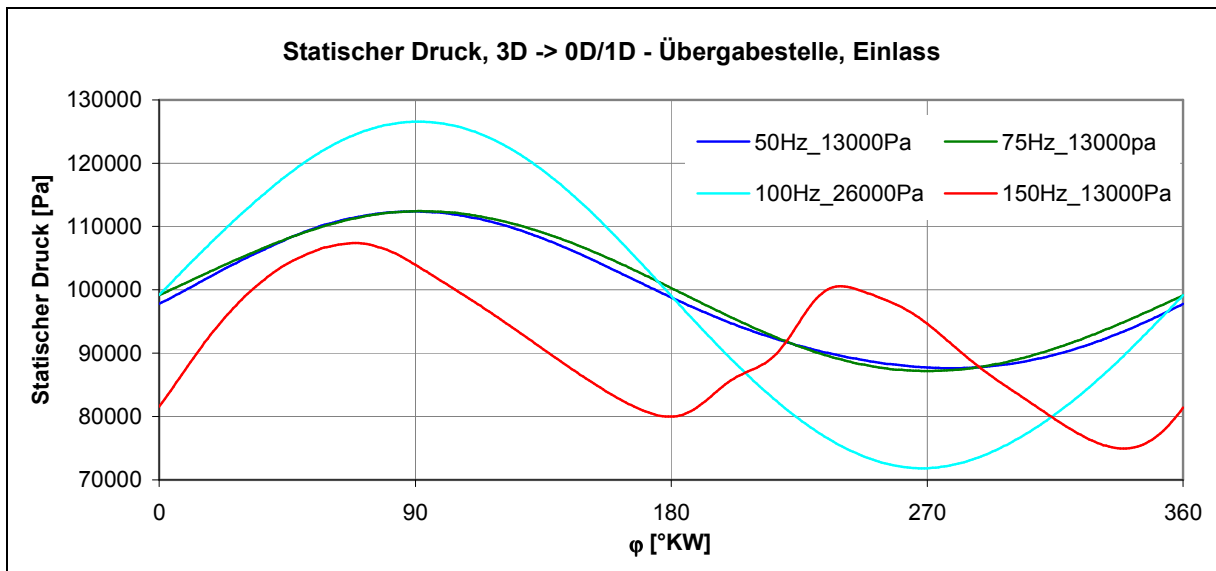


Abbildung 5-30: Statische Drücke in den Übergabe-Zellsektionen des 3D-Modells

Nicht zuletzt auf Grund der in Abbildung 5-31, mit einer anderen Skalierung der Achsen, noch einmal dargestellten relativ guten Übereinstimmung und des relativ konstanten Niveaus der Übertragungsfaktoren bei 50, 75 und 100Hz drängt sich der Verdacht eines Resonanzeffektes, als Ursache für die deutlich anderen Eigenschaften der Ergebnisse bei 150Hz, auf.

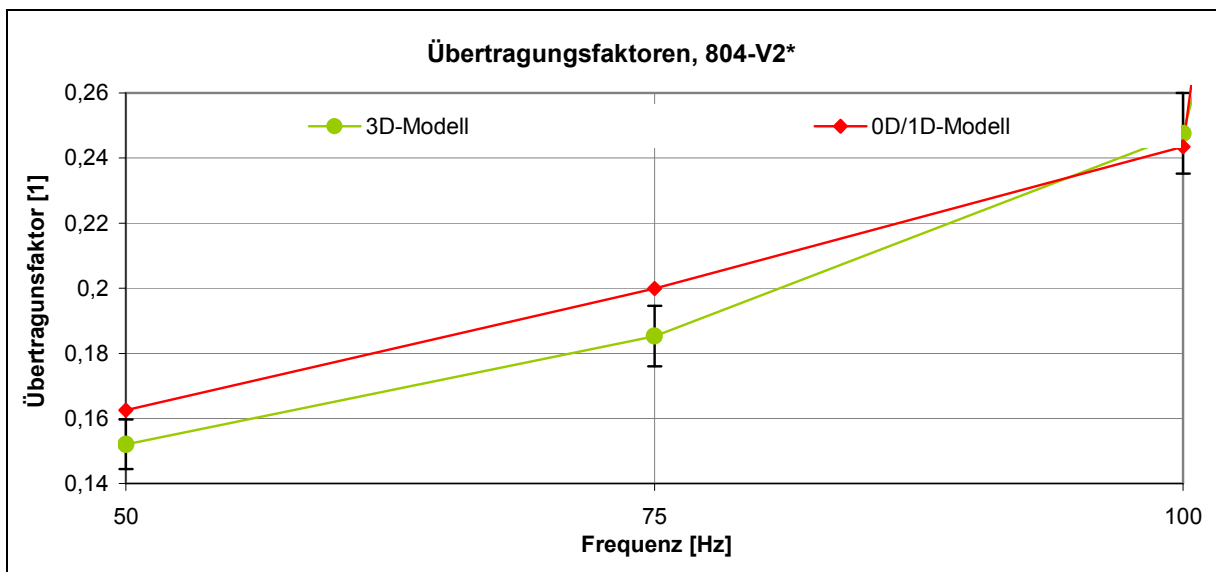


Abbildung 5-31: Übertragungsfaktoren 804-V2*, 50, 75 und 100 Hz

Um dies zu überprüfen, wurden die an den Enden der Runner aufgebrauchten Verlängerungen (türkise und grüne Rohre in Abbildung 5-28) weggenommen und damit die Wege zwischen den Rändern deutlich verkürzt. Somit ist zwar keine Auswertung der Übertragungsfaktoren mehr möglich, es kann allerdings ein Vergleich anhand des, bereits in Abbildung 5-30 herangezogenen, statischen Druckes in der Einlass-Übergabe-Zellsektion des 3D-Modells erfolgen. Genau dieser Vergleich ist in Abbildung 5-32 zu sehen und kann als Bestätigung für die oben erwähnte Vermutung verstanden werden. Die Rechnung mit der verkürzten Geometrie und den exakt gleichen Randbedingungen (150Hz_13000Pa*) führt, im Gegensatz zur 150Hz-Beaufschlagung der ursprünglichen Geometrie, ähnlich wie die niederfrequenten Randbedingungen, zu einem harmonischen Verlauf der Vergleichsgröße.

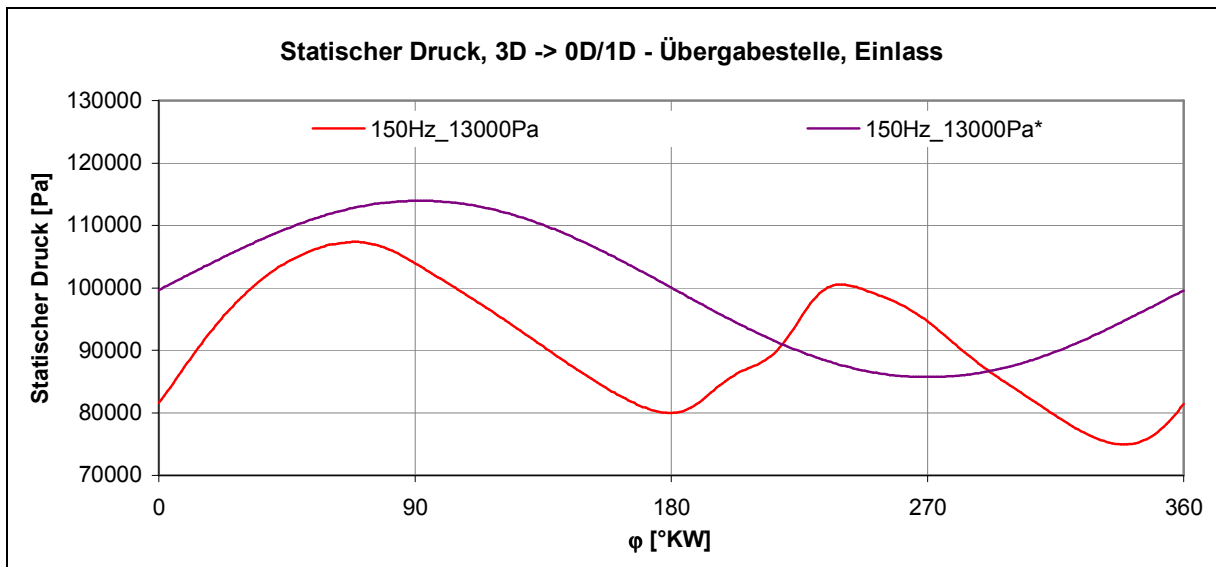


Abbildung 5-32: Statische Drücke in den Übergabe-Zellsektionen des 3D-Modells, 150 Hz

Damit kann die Komplexität der Geometrie als Ursache für die große Abweichung der Übertragungsfaktoren bei 150Hz praktisch ausgeschlossen werden. Infolgedessen fehlt, auf Grund der relativ kleinen Abweichungen bei den anderen Frequenzen, die Unterscheidung zu den in 5.4.1 und 5.4.2 untersuchten Geometrien hinsichtlich Übereinstimmung der Übertragungsfaktoren und damit der Hinweis auf die deutlich größeren Abweichungen zwischen 0D/1D- und gekoppelten 1D/3D-Motormodell.

5.4.5 Resümee zur Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung

Wie die eben betrachteten Ergebnisse zeigen, konnte die hier getestete Methode, hinsichtlich ihrer Fähigkeit die 0D/1D-Abbildbarkeit komplexer Geometrien vorauszusagen, aus mehrerlei Gründen nicht überzeugen.

Zum einen liefert die *Harmonische Druckwellenbeaufschlagung* für zwei vergleichbare 0D/1D-Modelle (Y-Verteiler mit Refined-Model-Junction bzw. Constant-Static-Pressure-Junction) stark unterschiedliche Abweichungen vom 3D-Modell, die bei Betrachtung der zur Verifizierung durchgeführten Motorprozessrechnung nicht feststellbar sind. Zum anderen tritt auch der umgekehrte Effekt auf, bei dem die Methode für eine sehr komplex geformte Geometrie (804_V2*) Abweichungen zwischen den 0D/1D- und den 3D-Übertragungsfaktoren liefert, die kaum größer sind als jene, die sich für eine Geometrie mit deutlich einfacherer Gestalt (Würfel-Verteiler) ergeben, was von der Verifizierungsrechnung ebenfalls nicht bestätigt wird. Darüber hinaus führen Resonanzeffekte, die bei den gewählten Randbedingungen praktisch nicht zu vermeiden sind, zu einer Verzerrung der interessierenden Größen.

Außerdem wurden für Geometrien deren 0D/1D-Abbildung konische Rohre erfordert (804_V2) Ergebnisse erzielt, die derart grundlegend von den entsprechenden Größen im 3D-Modell abweichen, dass die einzige Erkenntnis daraus das Versagen der Methode für solche Fälle sein kann. Auf Grund der - wie oben bereits angemerkt - nicht besonders vielversprechenden Ergebnisse, welche die *Harmonische Druckwellenbeaufschlagung* für die Bewertung von 0D/1D-Modellen ohne konische Rohre liefert, wird vorerst der Ursache für diese physikalisch schwer interpretierbaren Ergebnisse nicht weiter nachgegangen.

5.5 Massenstrombeaufschlagung

Auch wenn die im Folgenden getestete *Massenstrombeaufschlagung* hinsichtlich einer möglichst hohen Allgemeingültigkeit der erzielten Ergebnisse, im Vergleich zur *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*, einen kleinen Rückschritt bedeutet, ist der Test, allein durch das Bestreben eine Bewertungsmöglichkeit zu finden, die auch für Modelle mit konischen Rohren verwertbare Ergebnisse liefert, gerechtfertigt. Um möglichst rasch herauszufinden, ob diese Bewertungsmethode die Anforderung erfüllen kann, wurde die Untersuchung der einfacheren Geometrien zunächst übersprungen und sofort die Geometrie 804-V2, die ja bekanntlich konische Runner besitzt, bewertet.

Wie der Name bereits vermuten lässt, soll die Vorgabe von Massenströmen zu den angestrebten möglichst realen Strömungszuständen führen. Die Massenströme, die sich bei der Verwendung der zu untersuchenden Geometrie als 3D-Gebiet eines gekoppelten Motormodells einstellen, dürfen an dieser Stelle nicht als bekannt vorausgesetzt werden. Infolgedessen ist die Aufbringung der Massenströme an Stellen, an denen sie bestimmten Restriktionen unterliegen, als vorteilhaft zu erachten. Die Zylindermassenströme, die über weite Bereiche des Zyklus identisch Null sind, eignen sich daher hervorragend. Der Verlauf der Massenströme bei geöffneten Ventilen ist damit allerdings noch nicht bekannt. Für den Fall, dass sich diese Methode bewährt, wird daher die Entwicklung von normierten Kurven, die multipliziert mit zylinderhubraumabhängigen Faktoren einen vereinfachten Zylindermassenstrom liefern, vorgeschlagen. Für die hier durchgeführte Potentialabschätzung der Methode ist allerdings die Vorgabe möglichst realer Massenstromverläufe zu bevorzugen. Zu diesem Zweck wurden die im gekoppelten 1D/3D-Motormodell der 804-Zweivolumentypvariante (804_Koppelung_V2) berechneten und in Abbildung 5-33 dargestellten Zylindermassenströme verwendet.

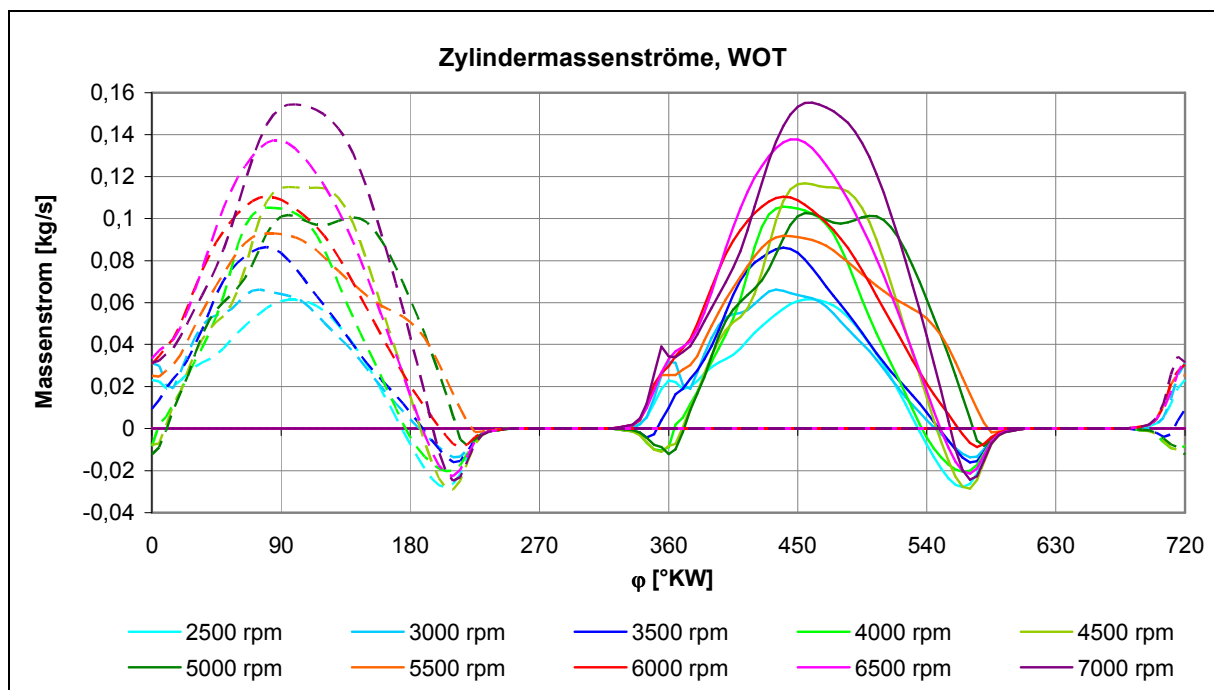


Abbildung 5-33: Zylinder-Einlassmassenströme des Modells 804_Koppelung_V2

5.5.1.2 0D/1D-Modell

Aus den bereits in Kapitel 5.4 genannten Gründen, werden auch bei der *Massenstrombeaufschlagung* statische Drücke und Temperaturen als Randbedingungen des 0D/1D-Modells verwendet. Auch die Ermittlung der dafür erforderlichen Werte funktioniert, wie in Abbildung 5-35 zu sehen ist, analog zur *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*, durch die Übergabe der oben genannten Größen aus dafür geeigneten Zellelektionen des bereits berechneten 3D-Modells.

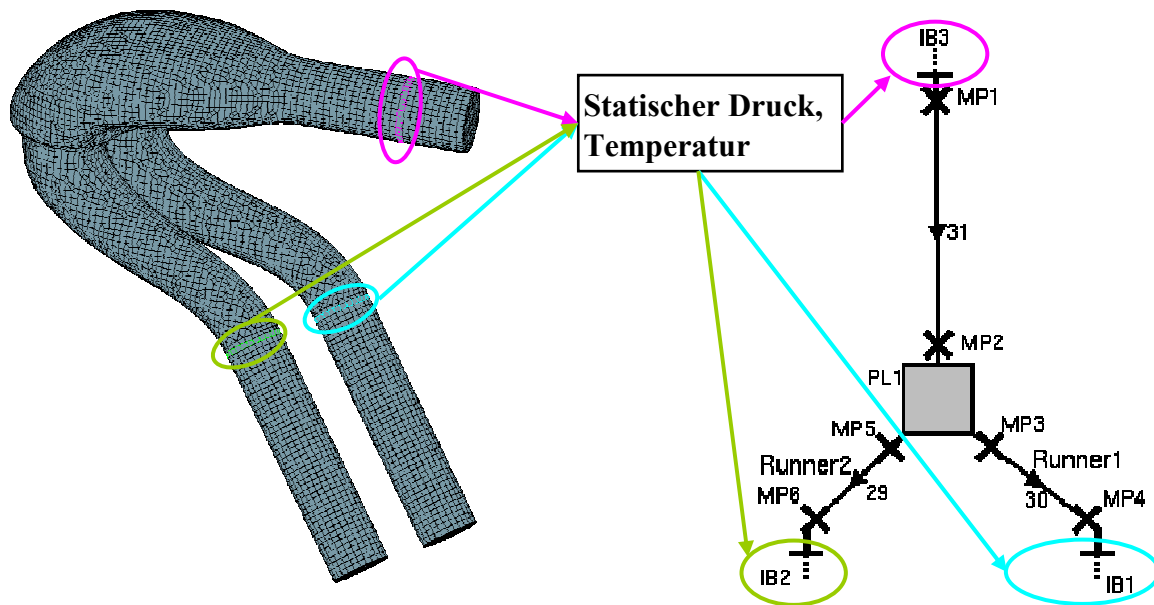


Abbildung 5-35: Randbedingungs-Übergabe bei der *Massenstrombeaufschlagung*

5.5.1.3 Auswertung

Im Falle eines 0D/1D-Modells, welches das 3D-Modell sehr gut nachbildet, muss sich, auf Grund der gleichen Drücke und Temperaturen an den Rändern, eine sehr gute Übereinstimmung der Massenströme ergeben. Daher ist es naheliegend zur Beurteilung der 0D/1D-Abbildbarkeit genau diese Übereinstimmung zu prüfen.

Abbildung 5-36 - rechts zeigt die Massenströme an den Rändern des 0D/1D-Modells über alle 20 gerechneten Zyklen. Die Gestalt dieser Verläufe weist eine große Ähnlichkeit zu den in Kapitel 5.4.3 vorgestellten Ergebnissen auf und hat derart wenig mit den entsprechenden Massenflüssen des 3D-Modells gemein, dass auf eine direkte Gegenüberstellung verzichtet wird. Die Pfeile in Abbildung 5-36 - links deuten die jeweiligen Strömungsrichtungen an, die sich, wie Abbildung 5-36 - rechts zeigt, nicht ändern. Während im 0D/1D-Modell die Luft durch den Runner2 ein- und durch Runner1 und das „Einlassrohr“ wieder ausströmt, stellt sich im Einlassrohr des 3D-Modells eine Strömung ein, die ihre Richtung innerhalb eines Zyklus mehrmals ändert. Die Massenströme am Ende der Runner sind im 3D-Modell ohnehin durch die Randbedingungen vorgegeben. Entsprechend den oben ausgeführten Überlegungen wäre eine sehr schlechte Abbildung der realen 3D-Geometrie durch das verwendete 0D/1D-Modell die logische Interpretation dieses Ergebnisses. Wie in Abbildung 5-37 angedeutet, können, durch eine Variation der Durchflusskoeffizienten an den Einmündungen der Rohre in das Plenum, die über einen Zyklus transportierten Massen an jene des 3D-Modells angepasst werden.

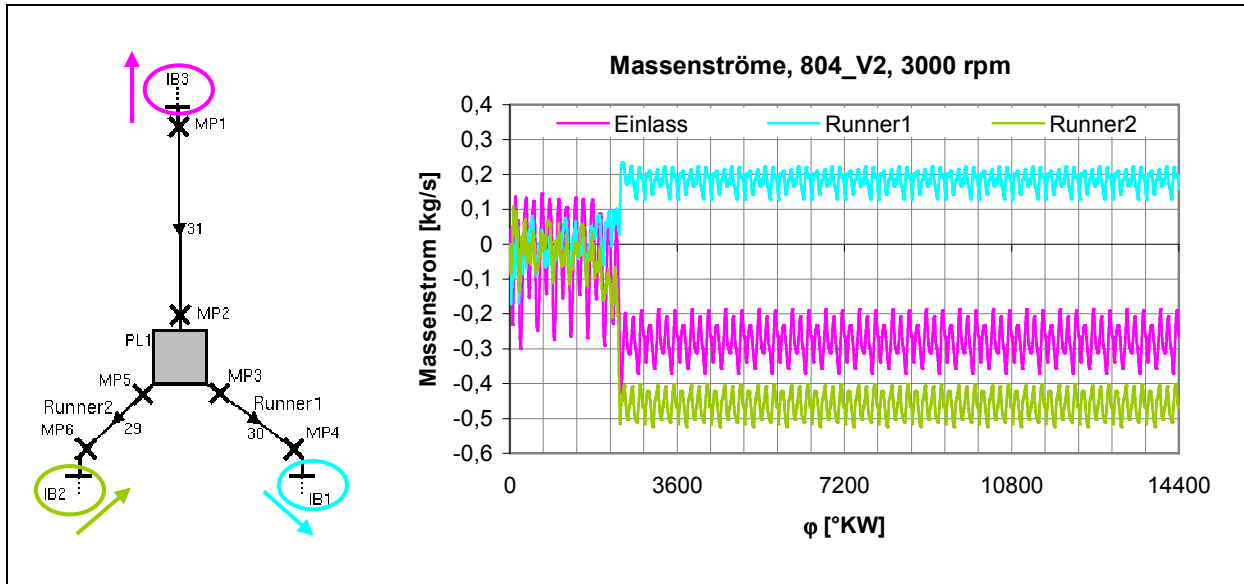


Abbildung 5-36: Ergebnisse der Massenstrombeaufschlagung, 804-V2, 0D/1D-Modell

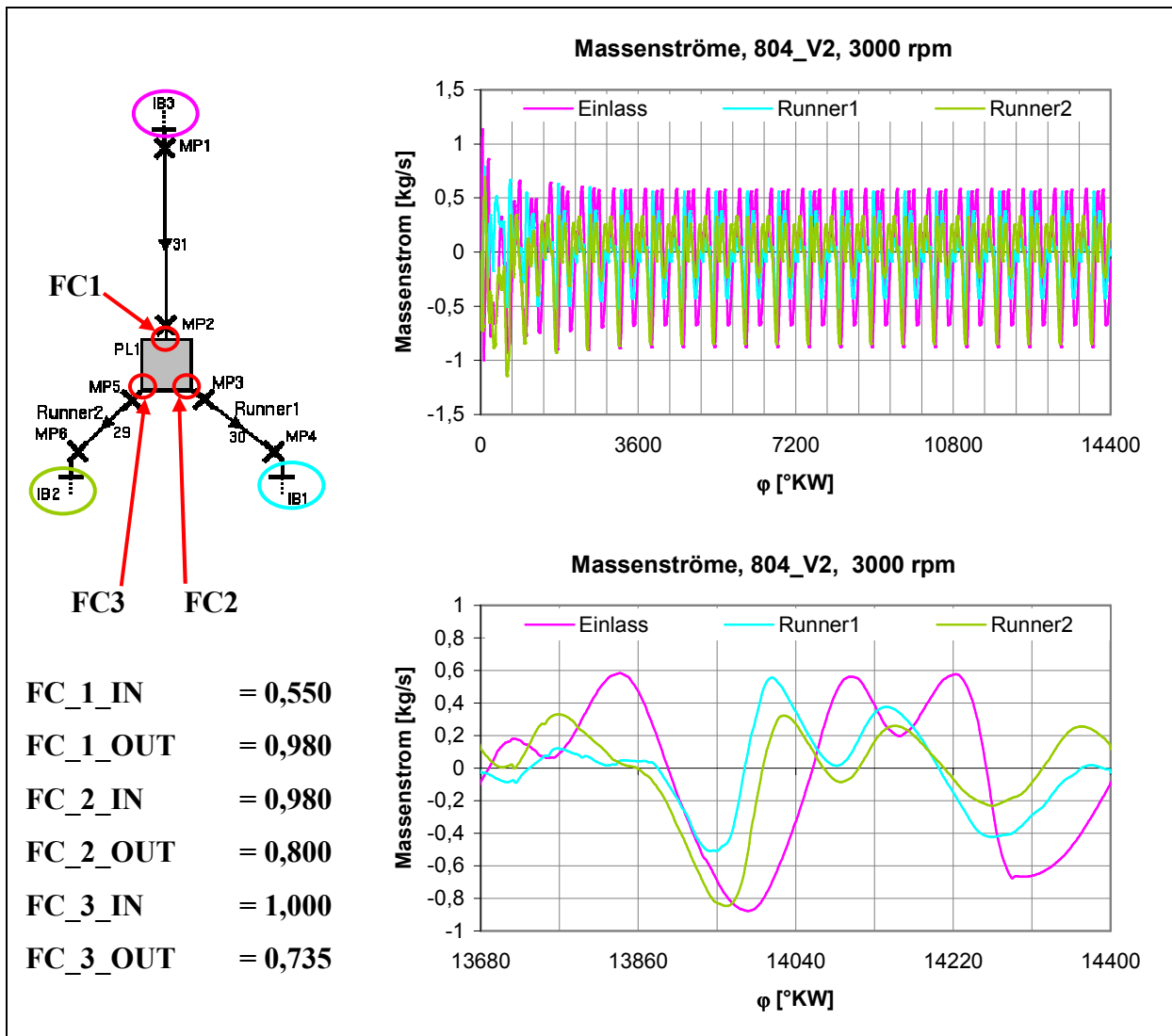


Abbildung 5-37: Ergebnisse der Massenstrombeaufschlagung, 804-V2, abgestimmtes 0D/1D-Modell

Da die Massenströme des 3D-Modells nicht als bekannt angenommen werden dürfen, stellt diese Vorgehensweise natürlich für die Praxis keinen gangbaren Weg dar. Außerdem hat sich gezeigt, dass auf diese Art und Weise abgestimmte Durchflusskoeffizienten immer nur für eine bestimmte Drehzahl Gültigkeit haben.

Nun stellt sich natürlich die Frage nach den Veränderungen, die durch eine 0D/1D-Abbildung mit Hilfe des in Kapitel 4.3 vorgestellten V2-Junction-Modell_J (siehe Abbildung 5-38 - links), welches ja im Rahmen der Motorprozessrechnung eine deutlich bessere Annäherung an das gekoppelte Modell geliefert hat als das V2-Plenum-Modell, erzielt werden können. Abbildung 5-38 - rechts zeigt, dass diese Veränderungen marginal sind. Der Erklärungsansatz, wonach diese eklatante Abweichung zu den 3D-Ergebnissen, auf Grund der Unterschiede in der Motorprozessrechnung, die zwar kleiner als jene des V2-Plenum-Modells aber dennoch vorhanden sind, gerechtfertigt ist, scheint spätestens nach der im Folgenden durchgeführten Untersuchung der Geometrie 804_V2* nicht zutreffend zu sein.

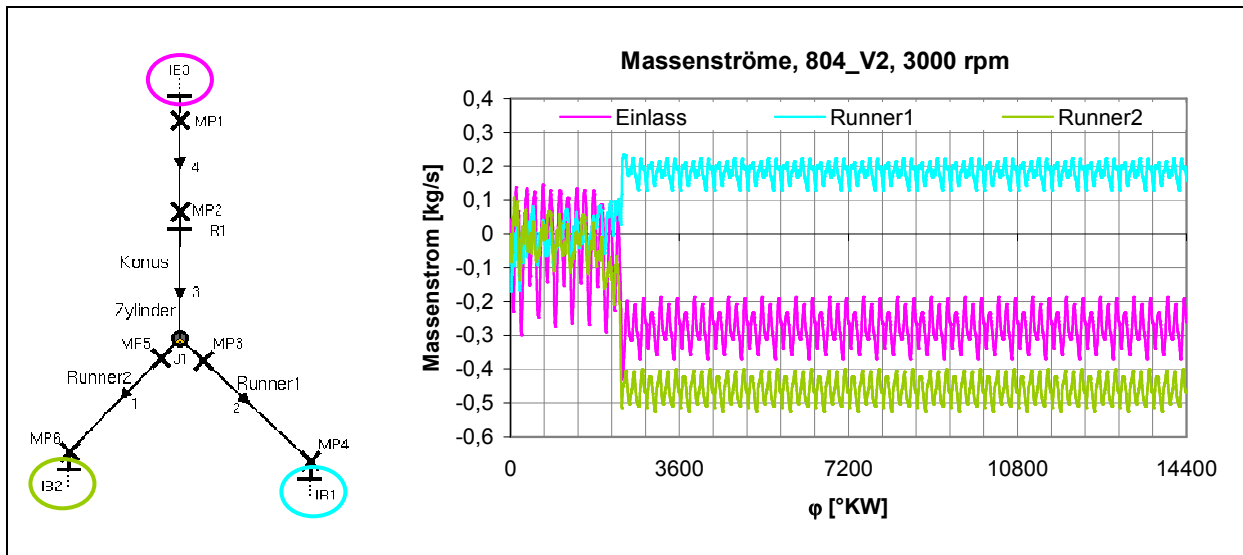


Abbildung 5-38: Ergebnisse der Massenstrombeaufschlagung, 804-V2, V2-JunctionModell_J

5.5.2 804-V2*

Bei der Bewertung dieser Geometrie, die sich nur durch die konstanten Durchmesser der Runner von 804_V2 unterscheidet, liefert das 0D/1D-Modell Massenströme, die, wie Abbildung 5-39 zeigt, qualitativ mit jenen des 3D-Modells übereinstimmen. Abgesehen von der Anpassung der Runner-Durchmesser entspricht das verwendete 0D/1D-Modell dem in Kapitel 5.5.1 für die Abbildung von 804_V2 verwendeten und in Abbildung 5-36 - links dargestellten Modell. Die starken Auswirkungen des in Abbildung 5-39 ersichtlichen etwas niedrigeren Niveaus der 0D/1D-Verläufe zeigen die durch Integration dieser entstehenden Kurven der kumulierten Massen in Abbildung 5-40.

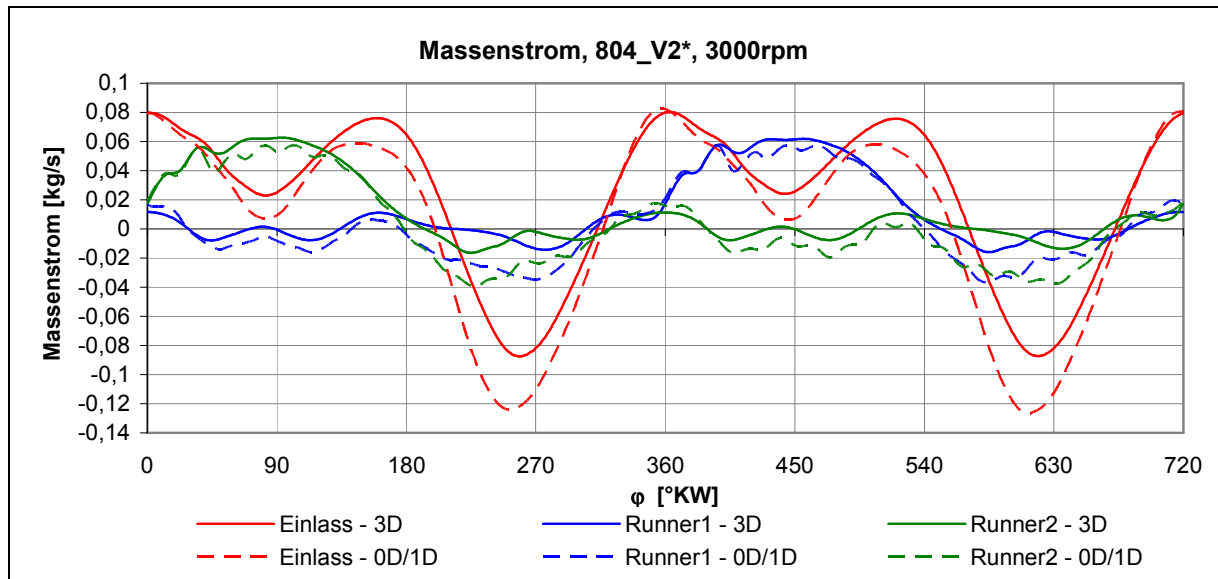


Abbildung 5-39: Ergebnisse der Massenstrombeaufschlagung, 804-V2*, Massenströme

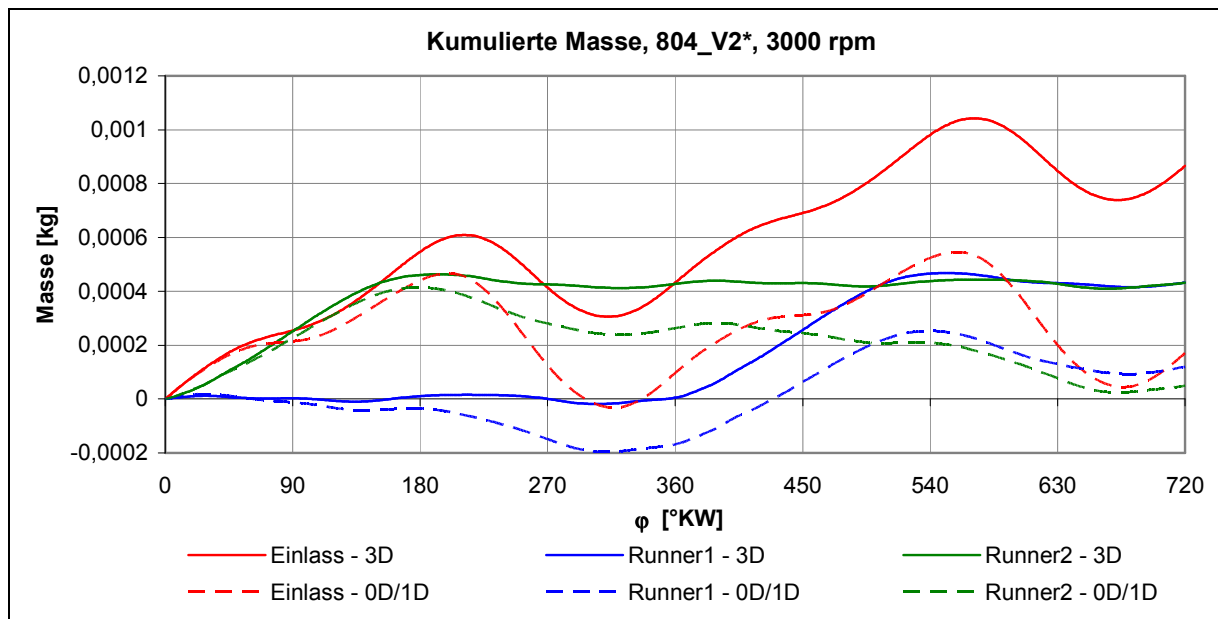


Abbildung 5-40: Ergebnisse der Massenstrombeaufschlagung, 804-V2*, kumulierte Massen

Diese Rechnungen wurden neben der Drehzahl 3000 auch für 4500 und 6000 1/min durchgeführt, wobei ähnlich große Abweichungen festzustellen waren. Um die Größe dieser

Abweichungen besser einschätzen zu können, wurde im nächsten Punkt der Y-Verteiler der *Massenstrombeaufschlagung* unterzogen.

Wie schon für 804-V2 wurde auch für 804-V2* die 0D/1D-Abbildung mit Hilfe des V2-JunctionModell_J getestet. Dabei stellten sich allerdings Massenströme mit der aus Kapitel 5.5.1.3 bekannten Gestalt ein. Die Ursache dafür ist auf ein in diesem Modell verwendetes konisches Rohr zurückzuführen.

5.5.3 Y-Verteiler

Für die Abbildung der Rohrverzweigung im 0D/1D-Modell wurden, wie auch schon im Rahmen der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*, die verschiedenen, von AVL Boost angebotenen, Möglichkeiten (Refined Model, Constant Static Pressure, Constant Pressure) getestet. Die in weiterer Folge dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Refined-Model-Junction, die über alle durchgeführten Rechnungen gesehen die beste Übereinstimmung mit dem 3D-Modell liefert. In Abbildung 5-41 und Abbildung 5-42 sind die mit der bereits bekannten, in Kapitel 5.5.1 näher erläuterten Vorgehensweise erzielten Ergebnisse für die Massenströme bzw. deren zeitliche Integrale dargestellt. Anhand dieser Abbildungen kann sehr gut erkannt werden, wie es zu den Abweichungen zwischen 0D/1D-Modell und 3D-Modell kommt. Dazu soll der Kurbelwinkelbereich 0 bis 180 °KW, also jene Phase in der auf Grund der Massenstromrandbedingung Luft durch den Runner2 in die Umgebung ausströmt, betrachtet werden. Während die dafür erforderliche Luftmasse im 3D-Modell ausschließlich vom Einlassrohr zur Verfügung gestellt wird (am Ende des Runner1 verhindert ja die Massenstromrandbedingung ein Nachströmen aus der Umgebung) wird im 0D/1D-Modell ein Teil dieser Luftmasse durch den Runner1 angesaugt. Dieses Verhalten kann durch einen im 0D/1D-Modell zu hoch abgebildeten Strömungswiderstand zwischen Einlassrohr und Runner2 bzw. einen zu niedrigen Strömungswiderstand zwischen Runner1 und Runner2 erklärt werden.

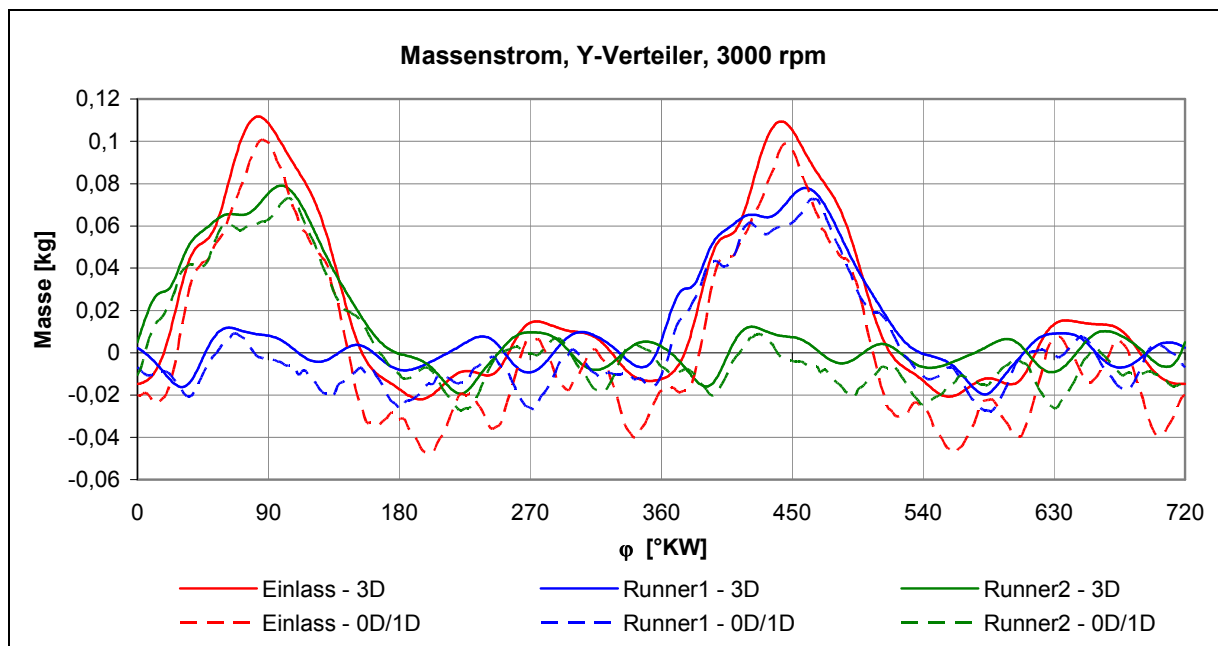


Abbildung 5-41: Ergebnisse der *Massenstrombeaufschlagung*, Y-Verteiler, Massenströme

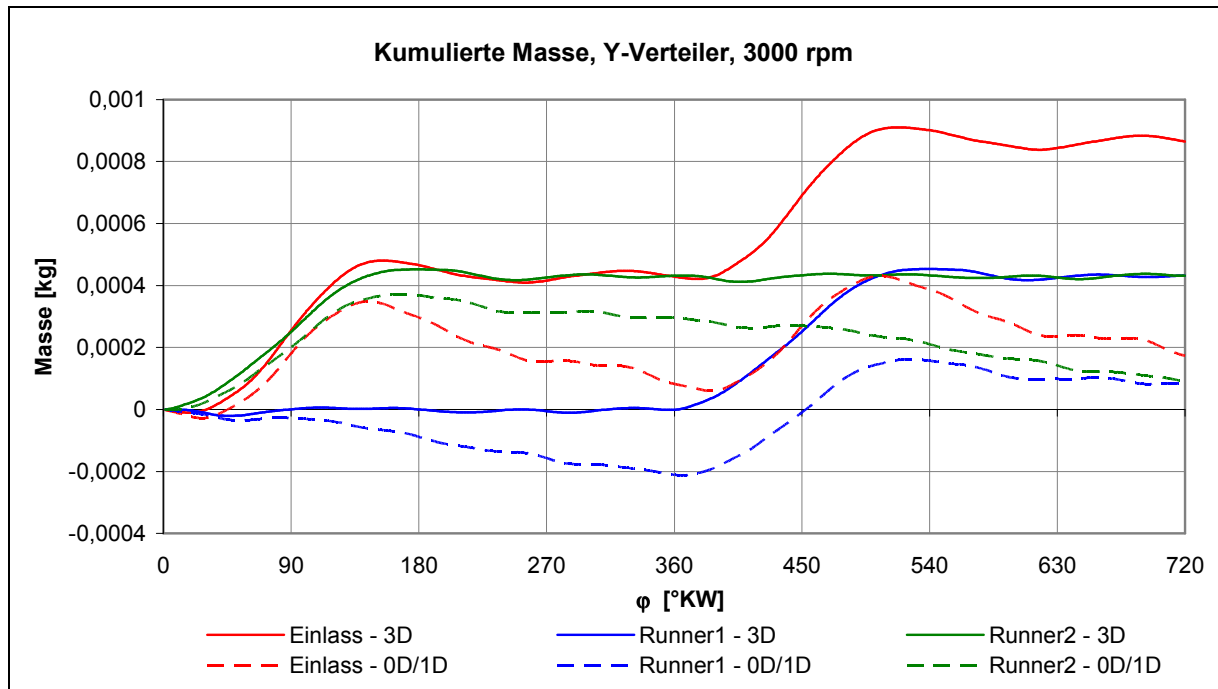


Abbildung 5-42: Ergebnisse der *Massenstrombeaufschlagung*, Y-Verteiler, kumulierte Massen

Dem kann, wie Untersuchungen gezeigt haben, durch Verwendung einer Constant-Pressure-Junction, welche die Angabe von Durchflusskoeffizienten ermöglicht, anstatt einer Refined-Model-Junction entgegengewirkt werden. Da eine solche Abstimmung der Durchflusskoeffizienten, aus den in Kapitel 5.5.1.3 erläuterten Gründen, nicht in Frage kommt, wird auf diese Ergebnisse hier nicht näher eingegangen.

5.5.4 804_V2* vs. Y-Verteiler

Der in Abbildung 5-43 dargestellte direkte Vergleich soll zeigen, ob die *Massenstrombeaufschlagung* in der Lage ist, die in Kapitel 5.2 festgestellten Unterschiede zwischen den Geometrien 804_V2* und Y-Verteiler hinsichtlich der Abweichungen zwischen 0D/1D- und gekoppelter 1D/3D-Motorprozessrechnung vorauszusagen. Wie zu sehen ist, liefert die zu testende Methode für die Drehzahl 3000 1/min, bei der sowohl für die Geometrie 804_V2* als auch für den Y-Verteiler beträchtliche Unterschiede in der Motorprozessrechnung auftreten, für beide Geometrien große Abweichungen zwischen 0D/1D- und 3D-Modell. Bei der Drehzahl 6000 1/min ist diese Abweichung für die Geometrie 804_V2* weiterhin groß während sie für den Y-Verteiler beinahe verschwindet, was gut mit den Ergebnissen der Motorprozessrechnung bei dieser Drehzahl übereinstimmt. Um dieses Potential der Methode genauer auszuloten, könnten nun weitere Drehzahlen untersucht werden. Da eine Methode, die nur für die Bewertung von 0D/1D-Modellen, welche keine konischen Rohre beinhalten, herangezogen werden kann aber wenig Sinn macht, wird darauf vorerst verzichtet.

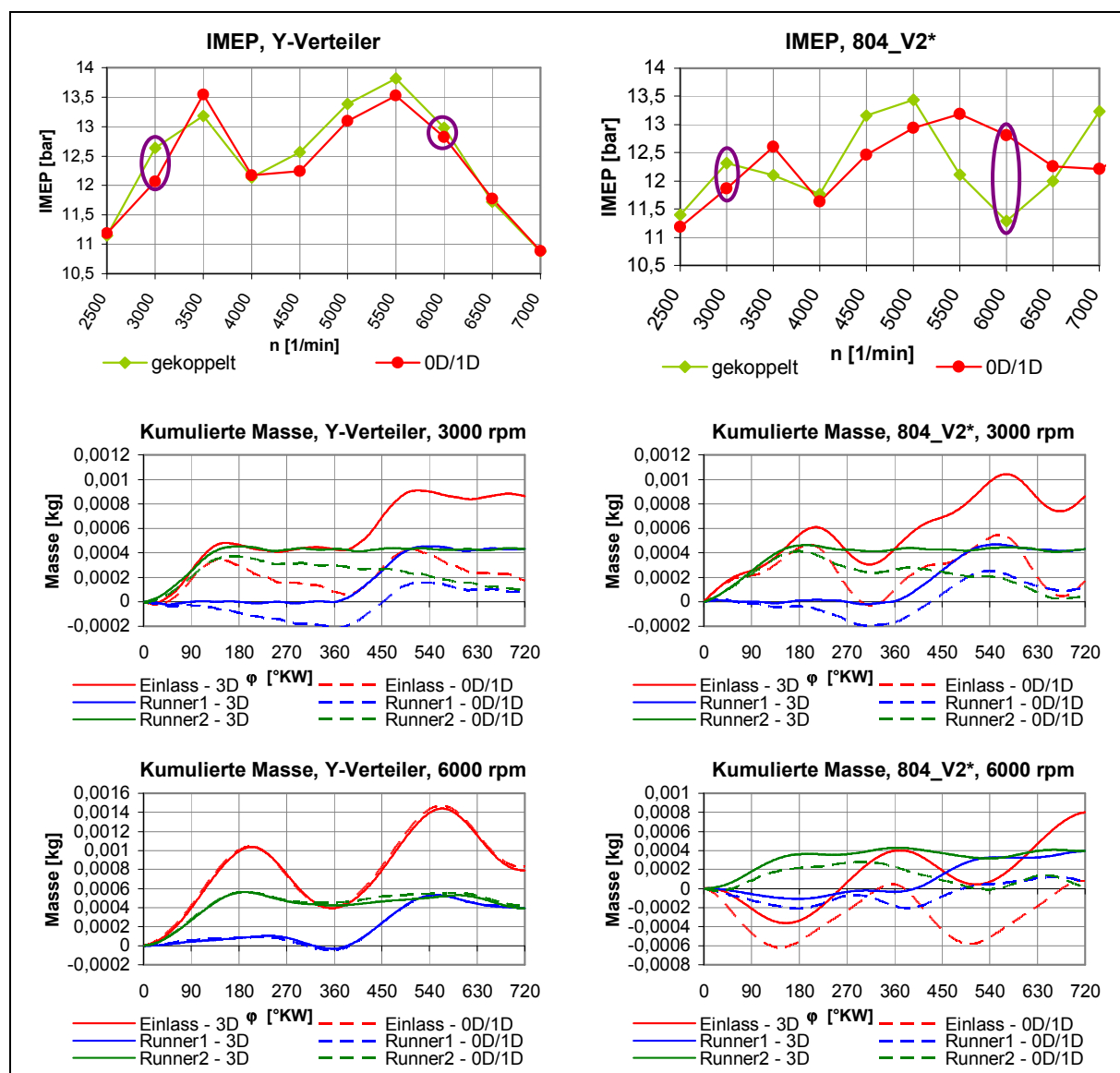


Abbildung 5-43: Vergleich zwischen Y-Verteiler und 804-V2*, Massenstrombeaufschlagung

5.5.5 Resümee zur Massenstrombeaufschlagung

Das oben genannte Ziel dieser Methode, auch für 0D/1D-Modelle, welche konische Rohre beinhalten, verwertbare Ergebnisse zu erzielen, konnte nicht erreicht werden. Allerdings ist es, im Gegensatz zu der in Kapitel 5.4 getesteten *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung*, gelungen anhand von Geometrien, deren 0D/1D-Abbildung keine Rohre mit veränderlichen Durchmessern erfordert, das Potential zur Voraussage der 0D/1D-Abbildbarkeit zu zeigen. Des Weiteren wurden auch, was die Ursache für die in Verbindung mit konischen Rohren auftretenden in ihrer Gestalt grundlegend von den 3D-Ergebnissen abweichenden 0D/1D-Massenströme angeht, neue Erkenntnisse gewonnen. Nachdem diese physikalisch schwer erklärbaren Ergebnisse auch im Rahmen der hier untersuchten *Massenstrombeaufschlagung*, die durch eine stärkere Orientierung der Randbedingungen am Motorprozess gekennzeichnet ist, auftreten, sind die bei der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung* vorgegebenen stark vereinfacht gewählten Größen an den Rändern als Ursache praktisch auszuschließen.

5.6 Abschließende Untersuchungen

Da sich im Rahmen der Untersuchungen der *Massenstrombeaufschlagung* herausgestellt hat, dass konische Rohre nicht nur in Verbindung mit den deutlich vom Motorprozess losgelösten Randbedingungen der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung* zu Problemen führen, scheint eine nähere Betrachtung dieser Thematik naheliegend. Dem soll in den Kapiteln 5.6.1 und 5.6.2 Rechnung getragen werden. Kapitel 5.6.3 hingegen beschäftigt sich mit einer abgeänderten Variante der *Massenstrombeaufschlagung*, die jene Erkenntnisse bringen soll, welche auf Grund der oben genannten Probleme mit der ursprünglichen Vorgehensweise nicht erzielt werden konnten.

5.6.1 Untersuchungen am Shadow-Netzwerk

Um auszuschließen, dass auch die im Zuge der *Massenstrombeaufschlagung* gewählten Randbedingungen zu unrealistisch sind und damit als Ursache für die in Kapitel 5.5.1 gezeigten 0D/1D-Massenstromverläufe in Frage kommen, wurde das Shadow-Netzwerk des gekoppelten 1D/3D-Motormodells 804_Koppelung_V2_DI, das ja dem in Abbildung 5-36 - links dargestellten 0D/1D-Modell entspricht, mit den während eines gekoppelt gerechneten Zyklus an den Koppelstellen wirksamen Drücken und Temperaturen, also Randbedingungen die stärker an den Motorprozess orientiert kaum sein könnten, beaufschlagt. Wie sich zeigte stellen sich auch bei dieser Rechnung Massenflüsse mit der aus Kapitel 5.5.1 bekannten Charakteristik ein. Wählt man dieselbe Vorgehensweise beim Shadow-Netzwerk des gekoppelten 1D/3D-Motormodells 804_Koppelung_Y-Verteiler_DI, welches keine konischen Rohre enthält, ergeben sich Massenströme, die qualitativ mit den Massenströmen des gekoppelten 1D/3D-Motormodells übereinstimmend um ihre Nulllage schwingen.

5.6.2 Massenstrombeaufschlagung eines Konus

Zur Eingrenzung der Ursache für die mittlerweile gut bekannte Problematik, die bei der 0D/1D-Abbildung von Rohren mit veränderlichen Durchmessern auftritt, wurden, wie in Abbildung 5-44 zu sehen, die bisher betrachteten Geometrien auf einen rotationssymmetrischen Körper bestehend aus zwei zylindrischen und einem dazwischen liegenden, konischen Abschnitt zurückgeführt. Bei der Wahl der Abmessungen, erfolgte die Orientierung an den Runnern der Geometrie 804_V2.

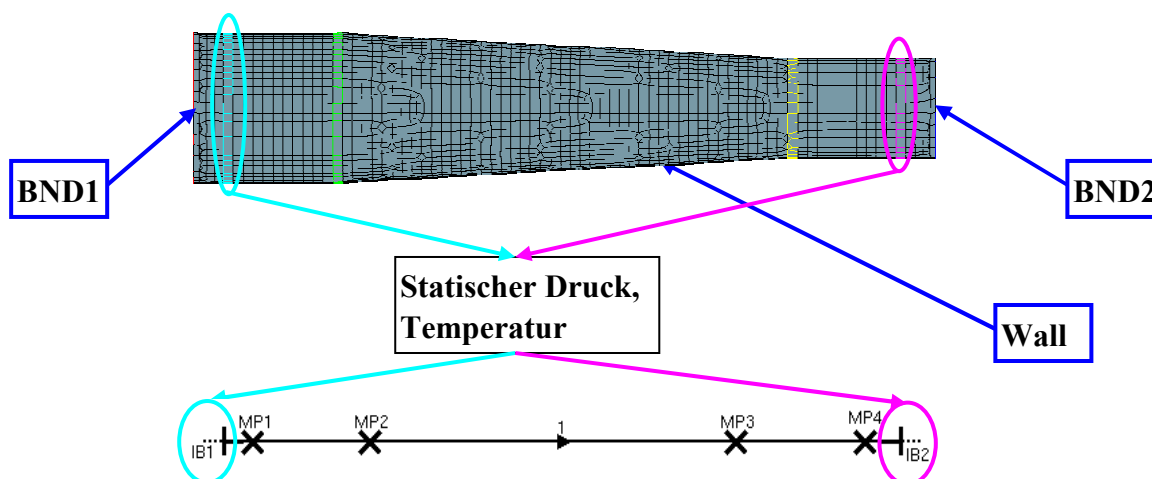


Abbildung 5-44: 3D- und 0D/1D-Modell eines Konus für die *Massenstrombeaufschlagung*

Die ähnlich zur Massenstrombeaufschlagung gewählten Randbedingungen des 3D-Modells können Tabelle 5-6 entnommen werden. Jene des 0D/1D-Modells werden, wie in Abbildung 5-44 ersichtlich, aus den Ergebnissen der 3D-Rechnung extrahiert.

BND1		BND2		Wall	
Totaldruck	100.000 Pa	Massenstrom	$f(\varphi)$	Temperatur	298,15 K
Temperatur	298,15 K				

Tabelle 5-6: Randbedingungen für die *Massenstrombeaufschlagung* eines Konus

Abbildung 5-45 und Abbildung 5-46 zeigen die berechneten Ergebnisse der beiden Modelle in Form von Massenströmen am linken (MP1) bzw. am rechten Rohrende (MP4). Trotz der hochfrequenten Oberschwingung, die nur bei den 0D/1D-Verläufen zu sehen ist, kann eindeutig eine qualitative Übereinstimmung erkannt werden.

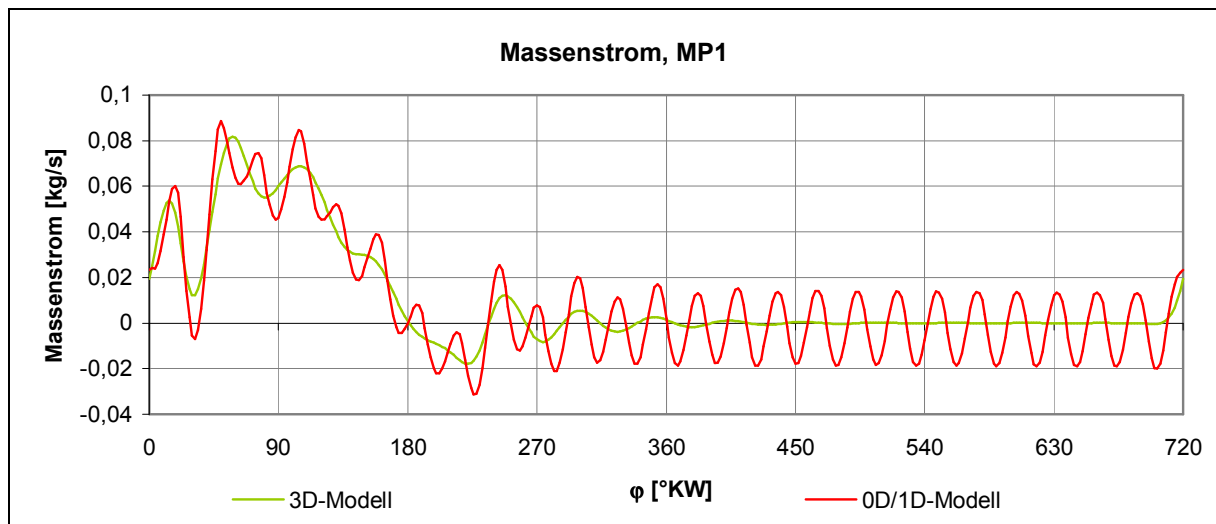


Abbildung 5-45: Massenstrom am linken Rohrende, *Massenstrombeaufschlagung* eines Konus

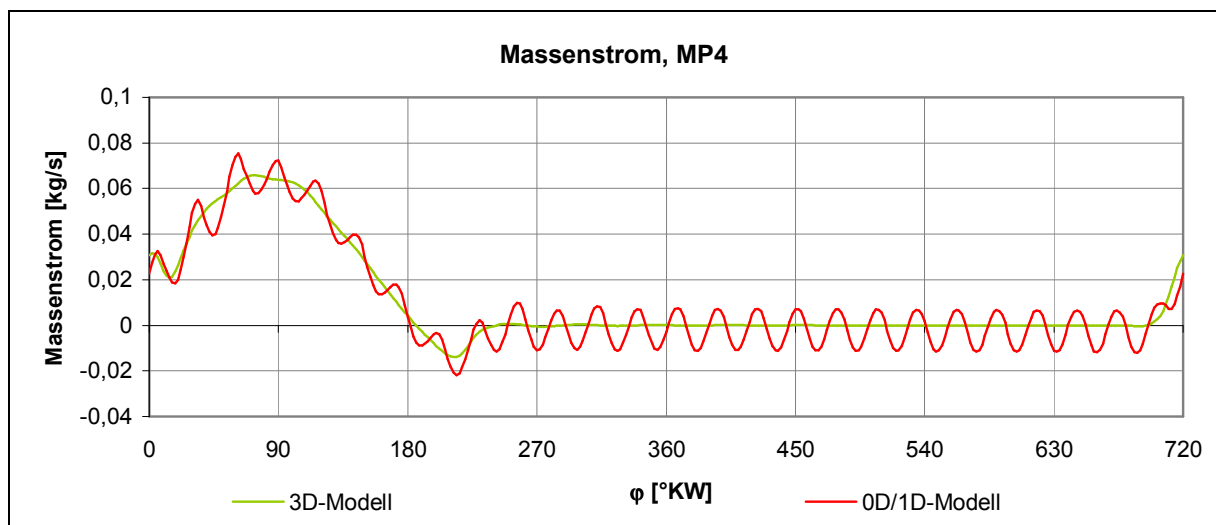


Abbildung 5-46: Massenstrom am rechten Rohrende, *Massenstrombeaufschlagung* eines Konus

Berücksichtigt man diese Resultate nun in den aus Kapitel 5.4 und 5.5 gewonnenen Erkenntnissen, kann die Kombination hochdynamischer Randbedingungen, einer komplexen Geometrie, welche durch das verwendete 0D/1D-Modell nur unzureichend abgebildet wird,

und konischen Rohren als ursächlich für die aus den Kapiteln 5.4.3 und 5.5.1 bekannten, von den entsprechenden Verläufen des 3D-Modells grundlegend abweichenden 0D/1D-Massenströme festgestellt werden. Die fehlerhafte 0D/1D-Abbildung der komplexen Geometrie führt dabei zu mehr oder weniger starken Abweichungen zwischen 0D/1D und 3D-Modell hinsichtlich der Zustandsgrößen an den Enden der konischen Rohre. Damit werden diese im 0D/1D-Modell indirekt mit einem Druckgefälle beaufschlagt, welches bei der Lösung der Erhaltungsgleichungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Querschnittsänderung zu den bekannten Ergebnissen führt. Da derartige Lösungen, deren physikalische Richtigkeit mangels Einblick in den Rechen-Code von AVL Boost nicht beurteilt werden kann, auf Grund der deutlich anders gewählten Randbedingungen, im Rahmen der Motorprozessrechnung nicht auftreten wird die Nachuntersuchung mit folgender Erkenntnis abgeschlossen. Treten bei der Bewertung mehrerer 0D/1D-Modelle hinsichtlich ihrer Fähigkeit eine komplexe Geometrie abzubilden, die aus den Kapiteln 5.4.3 und 5.5.1 bekannten, eklatanten Abweichungen der 0D/1D-Ergebnisse von jenen des 3D-Modells auf, so kann in diesen Fällen zwar von einer unvollkommenen Abbildung ausgegangen werden, eine Quantifizierung dieser ist allerdings nicht möglich. Angewandt auf das 0D/1D-Modell der Geometrie 804_V2 bedeutet dies, dass die in Kapitel 4.3 vorgestellte, im Vergleich zum V2-Plenum-Modell, bessere Abbildung durch das V2-Junction-Modell_J nicht vorausgesagt werden kann. Nachdem aber genau diese Voraussage das Ziel war, müssen die zu diesen Ergebnissen führenden Methoden als gescheitert betrachtet werden.

5.6.3 Inverse Massenstrombeaufschlagung

Auf Grund des konischen Rohrabschnittes, welcher zu den in Abbildung 5-38 dargestellten Massenstromverläufen führt, kann mit der oben vorgestellten Methode keine Bewertung des V2-Junction-Modell_J vorgenommen werden. Um dennoch zu zeigen, dass grundsätzlich mit Hilfe einer *Massenstrombeaufschlagung* auch die Bewertung solcher Geometrien möglich ist, wurde die aus Kapitel 5.5 bekannte Vorgehensweise etwas abgeändert. Wie in Abbildung 5-47 angedeutet, wird das zu untersuchende 0D/1D-Modell der komplexen Geometrie in das Motormodell integriert, eine 0D/1D-Motorprozessrechnung durchgeführt, Massenströme bzw. Totaldruck und Temperatur mit Hilfe geeignet positionierter Messpunkte ausgewertet und als Randbedingung für das 3D-Modell verwendet.

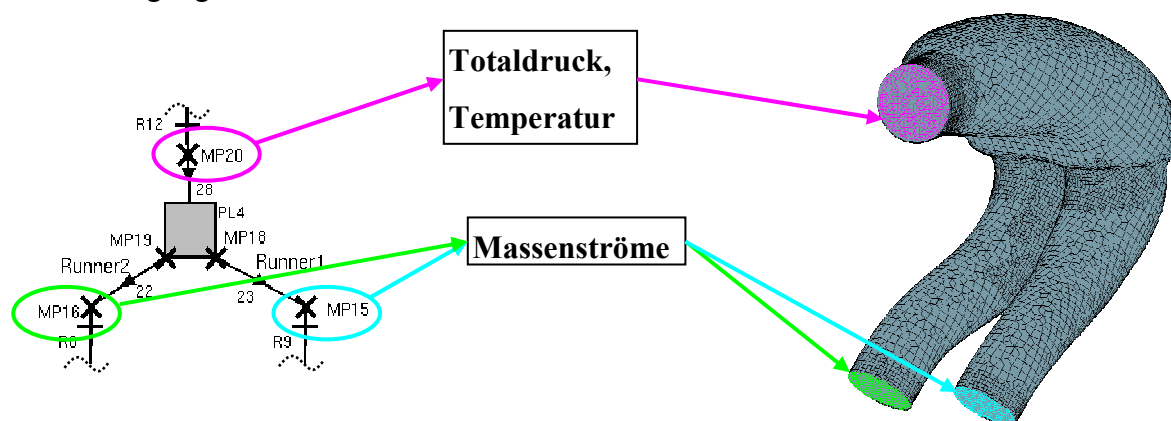


Abbildung 5-47: 0D/1D- und 3D-Modell des 804-V2 für die *Inverse Massenstrombeaufschlagung*

Im Anschluss an die 3D-Rechnung können die Massenströme sowie die statischen Drücke am Einlass von 0D/1D- und 3D-Modell verglichen werden. Konkret wurde die beschriebene Vorgehensweise für den Vergleich des ursprünglich verwendeten V2-Plenum-Modells mit dem V2-Junction-Modell_J, hinsichtlich ihrer Fähigkeit das Sekundärvolumen der 804-Zweivolumentvariante mit den Mitteln der 0D/1D-Simulation abzubilden, durchgeführt. Die beschriebene Rechnung wurde für 4500 1/min durchgeführt, da bei dieser Drehzahl das V2-Junction-Modell_J eine deutlich bessere Annäherung an die 3D-Abbildung liefert als das ursprünglich verwendete V2-Plenum-Modell (siehe Kapitel 4.3). Wie Abbildung 5-48 und Abbildung 5-49 zeigen, stimmen die Kurven in den rechten Diagrammen besser überein als jene in den linken.

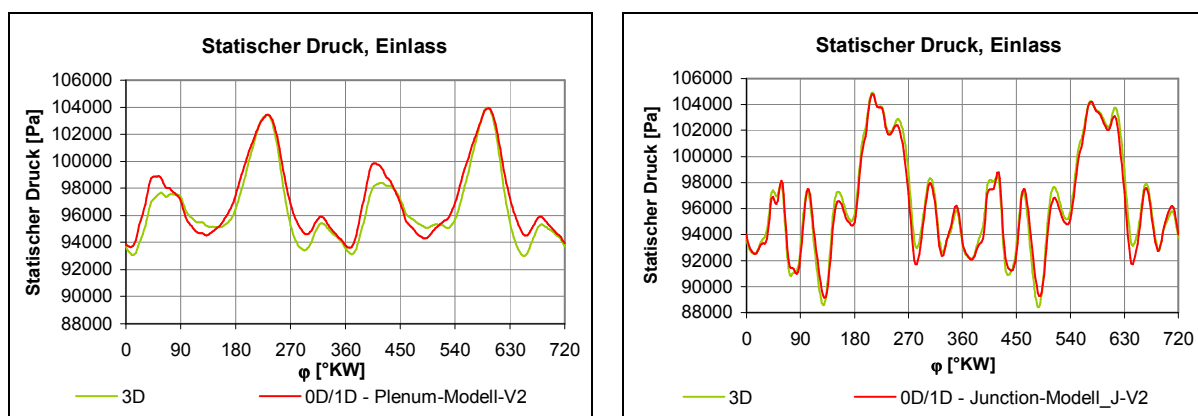


Abbildung 5-48: Vergleich der statischen Drücke am Einlass, *Inverse Massenstrombeaufschlagung*

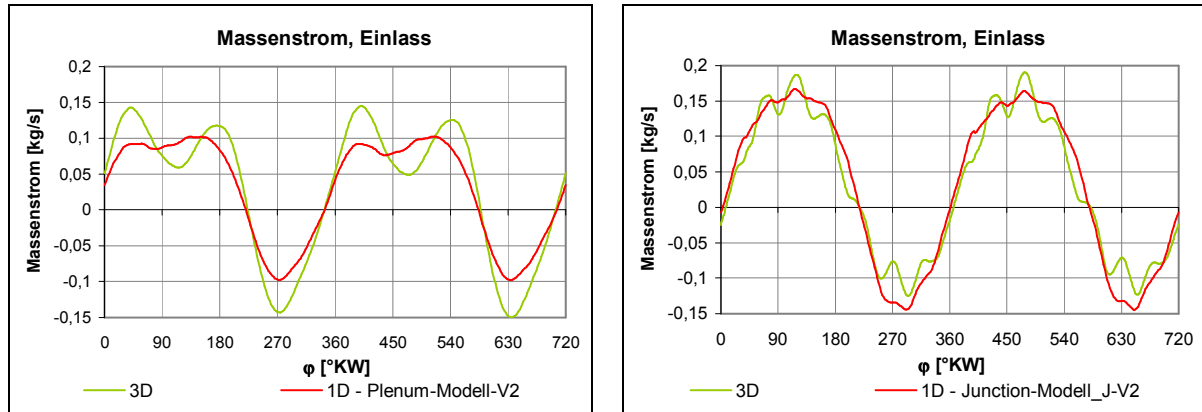


Abbildung 5-49: Vergleich der Massenströme am Einlass, *Inverse Massenstrombeaufschlagung*

Dies kann als richtige Voraussage des erwähnten Verhaltens der entsprechenden Motormodelle verstanden werden.

Die hier vorgestellte, abgeänderte Methode der *Massenstrombeaufschlagung* führt allerdings zu einem, von der Anzahl der zu bewertenden 0D/1D-Modellen abhängigen, relativ großen Rechenaufwand, da für jedes 0D/1D-Modell eine eigene 3D-Rechnung durchgeführt werden muss. Deshalb sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass diese abgeänderte Vorgehensweise nicht als praxisrelevante Methode angesehen wird, sondern weit mehr die grundsätzlichen Möglichkeiten einer *Massenstrombeaufschlagung* zeigen soll, was auch die Einordnung in diesem Kapitel erklärt.

6 Fazit

Betreffend die Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit von komplexen Geometrien im Luftpfad von Verbrennungskraftmaschinen können, mit Hilfe ausführlicher Analysen der Strömungsfelder, zwar dreidimensionale Effekte erkannt werden, eine allein auf solchen Analysen basierende Quantifizierung des Einflusses einzelner Effekte auf den Ladungswechsel scheint aber kaum möglich zu sein. Eine Voraussage der 0D/1D-Abbildbarkeit ohne Berechnungen durchzuführen, also nur auf Grund geometrischer Abmessungen, an welche eventuell das Auftreten einiger solcher Effekte geknüpft werden kann, stellt offensichtlich keinen ausreichend zuverlässigen Weg dar. Es wird daher eine Vorgehensweise, die auf numerischen, strömungsmechanischen Untersuchungen des betreffenden 3D-Modells und der in Frage kommenden 0D/1D-Abbildung beruht, grundsätzlich bevorzugt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu drei unterschiedliche Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für derartige Voraussagen getestet. Mit der *Stoßwellenbeaufschlagung* können sehr rasch Ergebnisse erzielt werden, die zwar den durch nulldimensionale Komponenten entstehenden Fehler aufzeigen, allerdings nicht für eine Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit ausreichen. Was die, im Hinblick auf eine angestrebte hohe Allgemeingültigkeit konzipierte, *Harmonische Druckwellenbeaufschlagung* betrifft, treten durch die Methode selbst verursachte und damit die entscheidenden Ergebnisse verfälschende Resonanzeffekte auf, weshalb keine Eignung zur Voraussage der 0D/1D-Abbildungsmöglichkeit festgestellt werden kann. Bei der weiters getesteten *Massenstrombeaufschlagung* konnte durchaus das Potential für eine solche Voraussage erkannt werden. Allerdings treten, wie auch bei der *Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung* bei Verwendung konischer Rohre im 0D/1D-Modell Ergebnisse auf, welche in diesen Fällen keine brauchbaren Aussagen zulassen. Da eine im numerischen Bereich liegende Ursache für diese Ergebnisse zumindest nicht ausgeschlossen werden kann, soll im Rahmen eines Folgeprojektes der Ersatz von AVL Boost durch ein anderes 0D/1D-Programm getestet werden. Eine positive Evaluierung der *Massenstrombeaufschlagung* kann frühestens dann erfolgen, wenn auch die Bewertung von 0D/1D-Modellen mit konischen Rohren verwertbare Ergebnisse liefert. Darüber hinaus muss die im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesene – verglichen mit der ursprünglichen Modellierung durch das V2-Plenum-Modell – bessere Eignung des V2-Junction-Modell_J durch die *Massenstrombeaufschlagung* bestätigt werden.

Neben den Erkenntnissen über mögliche Methoden zur Abschätzung der 0D/1D-Abbildbarkeit von komplexen Geometrien, liefert diese Arbeit auch aufschlussreiche Informationen über die gekoppelte 1D/3D-Motorprozessrechnung mit AVL Boost und AVL Fire, also über jene Simulationstools, welche häufig für die Auslegung von Luftpfaden, in denen räumliche Strömungsphänomene vermutet werden, zur Anwendung kommen. Die sich vertiefende Beschäftigung mit diesem Thema war von vornherein nicht geplant, erschien aber, auf Grund eklatanter Modellfehler, die im Zuge ausführlicher Analysen festgestellt wurden, unumgänglich und stellte schlussendlich einen wesentlichen Teil der Diplomarbeit dar. Konkret basieren die dabei gewonnenen Erkenntnisse auf zwei gekoppelten 1D/3D-Modellen, die sich auf ein und denselben Motor beziehen und sich durch eine ungleiche Ausdehnung des 3D-Bereichs unterscheiden. Es konnte gezeigt werden, dass die voneinander abweichenden Ergebnisse dieser Modelle nicht bzw. nur zu einem kleinen Teil auf die unterschiedliche

Berücksichtigung der dreidimensionalen Strömungseffekte, sondern auf eine fehlerhafte Funktion der Koppelstellen, die bei einem der beiden Modelle festzustellen war, zurückzuführen sind. Im Zuge der dadurch motivierten Berechnung weiterer gekoppelter Motormodelle, die als Abwandlungen der obengenannten verstanden werden können, wurde der Einfluss unterschiedlicher Modellparameter auf diese Fehlfunktion beleuchtet. Resultierend daraus konnten einerseits Bedingungen, die zum Auftreten der Fehler führen und damit nach Möglichkeit zu vermeiden sind und andererseits aber auch Empfehlungen, welche die im Anschluss an die Rechnung unbedingt durchzuführende Überprüfung der korrekten Funktion der Koppelstellen betreffen, abgeleitet werden.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ansaugtraktkonzepte	1
Abbildung 1-2:	Sekundärvolumen für einen Zwei- und Vierzylindermotor	2
Abbildung 1-3:	Prototyp des Zweivolumenansaugtraktes für den Zweizylindermotor.....	3
Abbildung 2-1:	Billanzierung einer physikalischen Größe	6
Abbildung 2-2:	Reynolds-Mittelung	9
Abbildung 3-1:	Stationär durchströmtes Plenum	15
Abbildung 3-2:	Trennungs- und Vereinigungsfälle des Refined Models	16
Abbildung 3-3:	Durchflusskoeffizienten des Refined Models	16
Abbildung 3-4:	Definition der Integrationsvolumina	18
Abbildung 3-5:	Datentransfer von 3D zu 1D	18
Abbildung 3-6:	Datentransfer von 1D zu 3D	18
Abbildung 3-7:	Einfluss der Koppelstellenposition	19
Abbildung 3-8:	Shadow-Netzwerk mit Fluid Links.....	19
Abbildung 4-1:	Indizierte Volllast-Mitteldrücke über Drehzahl, Ausgangsdaten.....	20
Abbildung 4-2:	0D/1D-Shadow-Modell und 3D-Domäne des Modells 804_Koppelung_V2	21
Abbildung 4-3:	0D/1D-Shadow-Modell und 3D-Domäne des Modells 804_Koppelung_V1+V2	21
Abbildung 4-4:	Statischer Druck in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle.....	22
Abbildung 4-5:	Stromlinien in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle.....	22
Abbildung 4-6:	Geschwindigkeitsvektoren in den 3D-Bereichen der gekoppelten 1D/3D-Modelle.....	23
Abbildung 4-7:	Massenstrom am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min	24
Abbildung 4-8:	Massenstrom am Austritt des Runner1 bei 5500 1/min	25
Abbildung 4-9:	Zurücklaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min.....	25
Abbildung 4-10:	Vorlaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 4500 1/min.....	26
Abbildung 4-11:	Vorlaufende Druckwelle am Austritt des Runner1 bei 5500 1/min.....	27
Abbildung 4-12:	Luftmasse im Zylinder1 zu Beginn der Hochdruckphase.....	28
Abbildung 4-13:	pV-Diagramm des Zylinder1 bei 4500 1/min	29
Abbildung 4-14:	Luft/Kraftstoff-Verhältnis im Zylinder1 zu Beginn der Hochdruckphase.....	29
Abbildung 4-15:	Saugrohre mit Injektoren und Referenz-Messpunkten	30
Abbildung 4-16:	Eingespritzte Kraftstoffmasse, Injektor1, dargestellt über gekoppelt gerechnete Zyklen.....	30
Abbildung 4-17:	Zugeführte und angesaugte Kraftstoffmasse bezogen auf den Zylinder1	31
Abbildung 4-18:	Gesamtmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2.....	32
Abbildung 4-19:	Kraftstoffmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2	33
Abbildung 4-20:	Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2.....	33
Abbildung 4-21:	Kraftstoffmassentransport über Koppelstellen, Koppelung_804_V2	34
Abbildung 4-22:	Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V2	35
Abbildung 4-23:	Temperaturen an den Koppelstellen, Koppelung_804_V1+V2_DI.....	36
Abbildung 4-24:	Indizierte Mitteldrücke über der Drehzahl, gekoppelte DI-Modelle.....	37
Abbildung 4-25:	Vergleich der angesaugten Luftmassen	38
Abbildung 4-26:	Vergleich der MPFI-Modelle mit verschobenen Koppelstellen	39
Abbildung 4-27:	Ansaugtrakt der SPFI-Modelle	40
Abbildung 4-28:	Integrationsvolumina der beiden gekoppelten Ausgangsmodelle.....	41
Abbildung 4-29:	0D/1D-Modelle des Sekundärvolumens der 804-Zweivolumenvariante.....	44
Abbildung 4-30:	Indizierte Mitteldrücke der 0D/1D-Alternativmodelle	45
Abbildung 5-1:	Geometrische Beschreibung des Y-Verteilers	47
Abbildung 5-2:	Geometrische Beschreibung des Würfel-Verteilers.....	48
Abbildung 5-3:	Beschreibung der Geometrie 804-V2	48
Abbildung 5-4:	Beschreibung der Geometrie 804-V2*	49
Abbildung 5-5:	IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit Y-Verteiler	51
Abbildung 5-6:	IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit Würfel-Verteiler.....	51
Abbildung 5-7:	IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit ursprünglichem Sekundärvolumen	52
Abbildung 5-8:	IMEP der 804-Zweivolumenvariante mit 804-V2*	52
Abbildung 5-9:	3D- und 0D/1D-Modell des Y-Verteilers für die <i>Stoßwellenbeaufschlagung</i>	54
Abbildung 5-10:	Druckwellenausbreitung im Y-Verteiler.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-11:	Druckwellenausbreitung im Einlassrohr des Würfel-Verteilers	56
Abbildung 5-12:	Druckwellenausbreitung im Runner1 des Würfel-Verteilers.....	57
Abbildung 5-13:	Druckwellenausbreitung im Einlassrohr der Geometrie 804-V2.....	57
Abbildung 5-14:	Druckwellenausbreitung im Auslassrohr1 der Geometrie 804-V2	58
Abbildung 5-15:	Totaldruck am Einlass des Sekundärvolumens.....	59
Abbildung 5-16:	3D-Modell des Y-Verteilers für die <i>Harmonische Druckwellenbeaufschlagung</i>	61
Abbildung 5-17:	Randbedingungs-Übergabe bei der <i>Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung</i>	63
Abbildung 5-18:	Modelle zur Verifizierung der Randbedingungsübergabe	64
Abbildung 5-19:	Massenströme an Auswerteposition, Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe.....	64
Abbildung 5-20:	Statische Drücke an Auswerteposition, Verifizierung der Randbedingungs-Übergabe.....	65
Abbildung 5-21:	Auswertung <i>Harmonische Druckwellenbeaufschlagung</i>	66
Abbildung 5-22:	Übertragungsfaktoren des Y-Verteilers	67
Abbildung 5-23:	3D- und 0D/1D-Modell des Würfel-Verteilers, <i>Harm. Druckwellenbeaufschlagung</i>	68
Abbildung 5-24:	Übertragungsfaktoren des Würfel-Verteilers.....	68
Abbildung 5-25:	3D- bzw. 0D/1D-Modell der Geometrie 804-V2, <i>Harm. Druckwellenbeaufschlagung</i>	69
Abbildung 5-26:	Einlassmassenstrom der 804-V2-Modelle im letzten gerechneten Zyklus	70
Abbildung 5-27:	Einlassmassenstrom der 804-V2-Modelle über alle 30 gerechneten Zyklen	70
Abbildung 5-28:	3D- bzw. 0D/1D-Modell der Geometrie 804-V2*, <i>Harm. Druckwellenbeaufschlagung</i>	71
Abbildung 5-29:	Übertragungsfaktoren 804-V2*, alle berechneten Frequenzen.....	71
Abbildung 5-30:	Statische Drücke in den Übergabe-Zellsektionen des 3D-Modells.....	72
Abbildung 5-31:	Übertragungsfaktoren 804-V2*, 50, 75 und 100 Hz.....	72
Abbildung 5-32:	Statische Drücke in den Übergabe-Zellsektionen des 3D-Modells, 150 Hz.....	73
Abbildung 5-33:	Zylinder-Einlassmassenströme des Modells 804_Koppelung_V2	75
Abbildung 5-34:	3D-Modell der Geometrie 804-V2 für die <i>Massenstrombeaufschlagung</i>	76
Abbildung 5-35:	Randbedingungs-Übergabe bei der <i>Massenstrombeaufschlagung</i>	77
Abbildung 5-36:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , 804-V2, 0D/1D-Modell.....	78
Abbildung 5-37:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , 804-V2, abgestimmtes 0D/1D-Modell.....	78
Abbildung 5-38:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , 804-V2, V2-JunctionModell_J.....	79
Abbildung 5-39:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , 804-V2*, Massenströme	80
Abbildung 5-40:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , 804-V2*, kumulierte Massen	80
Abbildung 5-41:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , Y-Verteiler, Massenströme	81
Abbildung 5-42:	Ergebnisse der <i>Massenstrombeaufschlagung</i> , Y-Verteiler, kumulierte Massen	82
Abbildung 5-43:	Vergleich zwischen Y-Verteiler und 804-V2*, <i>Massenstrombeaufschlagung</i>	83
Abbildung 5-44:	3D- und 0D/1D-Modell eines Konus für die <i>Massenstrombeaufschlagung</i>	85
Abbildung 5-45:	Massenstrom am linken Rohrende, <i>Massenstrombeaufschlagung</i> eines Konus	86
Abbildung 5-46:	Massenstrom am rechten Rohrende, <i>Massenstrombeaufschlagung</i> eines Konus	86
Abbildung 5-47:	0D/1D- und 3D-Modell des 804-V2 für die <i>Inverse Massenstrombeaufschlagung</i>	88
Abbildung 5-48:	Vergleich der statischen Drücke am Einlass, <i>Inverse Massenstrombeaufschlagung</i>	88
Abbildung 5-49:	Vergleich der Massenströme am Einlass, <i>Inverse Massenstrombeaufschlagung</i>	89

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Ergebnisse für das stationär durchströmte Plenum.....	15
Tabelle 5-1:	Randbedingungen der <i>Stoßwellenbeaufschlagung</i>	54
Tabelle 5-2:	Anfangsbedingungen der <i>Stoßwellenbeaufschlagung</i>	54
Tabelle 5-3:	Randbedingungen der <i>Harmonischen Druckwellenbeaufschlagung</i>	61
Tabelle 5-4:	Parameter der Totaldruckfunktion in BND1	62
Tabelle 5-5:	Randbedingungen der <i>Massenstrombeaufschlagung</i>	76
Tabelle 5-6:	Randbedingungen für die <i>Massenstrombeaufschlagung</i> eines Konus.....	86

9 Literaturverzeichnis

- [1] Almbauer, R., Sturm, P.: Numerische Methoden in der angewandten Thermodynamik, Skriptum, TU Graz, 2009
- [2] AVL BOOST – Manual: 1D – 3D – Coupling, Version 5.1, Jänner 2008
- [3] AVL BOOST – Manual: Theory, Version 2009, Juli 2009
- [4] AVL BOOST – Manual: User Guide, Version 2009, Juli 2009
- [5] AVL FIRE - Manual: CFD Solver, Version 2009, April 2009
- [6] Durst, B., Thams, J., Görg, K.; BMW AG: Frühzeitige Beurteilung des Einflusses komplexer Bauteile auf den Ladungswechsel mittels gekoppelter 1D-3D-Strömungsberechnung, MTZ 61, 4/2000
- [7] Eichlseder, H.: Kolbenmaschinen, Skriptum, TU Graz, 2007
- [8] Eichlseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung, Skriptum, TU Graz, 2005
- [9] <http://www.rotax.com/de/Engine/2004/Motorcycle/Engine.Models.htm>
- [10] Pischinger, R., Klell, M, Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, SpringerWienNewYork, dritte Auflage, 2009
- [11] Schögl, O., Schmidt, S., Abart, M., Kirchberger, R.; TU Graz; Fitl, M., Gschwantner, Ph.; BRP-Powertrain: Early stage development of a 4- stroke gas exchange process by the use of a coupled 1D / 3D simulation strategy, SETC, 2009
- [12] Wimmer, A.: Thermodynamik des Verbrennungsmotors, Skriptum, TU Graz, 2004
- [13] Zinner, Ch.: Auslegung eines Motorenkonzeptes für 4-Takt Hochleistungsmotoren mit Saugrohr- und Direkteinspritzung mittels 1D, 3D und gekoppelter Simulationsansätze, Diplomarbeit, TU Graz, 2009