

Vorwort

Für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches gilt es vielfältigen Dank zu sagen:

Meiner Frau für die redaktionellen Hilfen und ihre Anregungen, meiner trockenen Ingenieurssprache zu mehr Abwechslung zu verhelfen.

Herrn Gerhard Bolz und Ralph Peter Stolle für die konsequente Durchsicht des Textes in fachlicher und sprachlicher Hinsicht.



Frau Muriel Lemarechal für die druckreifen Zeichnungen und Bilder, die sie aufgrund meiner Entwürfe und Skizzen angefertigt hat.

Herrn Prof. Dr. Ing. habil. H. J. Kretschmar, Hochschule Zittau/Görlitz (FH), sowie Herrn Berndt Wischnewski, Berlin, (online-Dampf-Berechnung und peace-software) für die Unterstützung bei der Berechnung der Dampfzustände.

Herrn Prof. Dr. Ing. R. Radespiel, TU Braunschweig, für seine Empfehlung, den Bunsenbrenner als typisches und gut beherrschbares Beispiel für eine Ejektorpumpe zu betrachten.

Mr. D. A. G. Brown für seinen Hinweis auf den erheblichen Einfluss der Grenzschicht bei kleinen Rohrdurchmessern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Wulf Dieter Heinrich, der als erfahrener und konsequenter Dampflokomotiv-Modellbauer das Manuskript systematisch durchgearbeitet hat. Auf der Basis von vielen interessanten Diskussionen habe ich seine zahlreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge in das Buch eingearbeitet.

1. Einleitung

Strömungsvorgänge spielen für die Funktion einer Dampflokomotive ebenso wie bei einem verkleinerten Modell eine wesentliche Rolle. In Düsen wird die Strömung beschleunigt und in Diffusoren entsprechend verzögert. Während Düsen im Betrieb in der Regel klaglos ihren Dienst tun, können einem verzögerte Strömungen in unzureichend konstruierten, gefertigten oder gewarteten Diffusoren die Freude am Betrieb einer Modell-Lokomotive nachhaltig verleiden, besonders bei kleinen Modellen. Häufig werden Düsen und Diffusoren bei vielen Anwendungen in Kombination eingesetzt. Typische Beispiele sind:

- Injektor
- Rauchkammerpumpe (Blasdüse-Schornstein)
- Hilfsbläser
- Ejektor
- Dampfdüse für Turbinen-Lichtmaschine
- Sicherheitsventil (Überdruck)
- Windleitbleche

Das Funktionieren dieser Düsen und Diffusoren ist oft von entscheidender Bedeutung für unsere Dampfmodelle. Düsen und Diffusoren weisen einige recht empfindliche Stellen auf, und wenn sie dort gestört werden, versagen sie ihren Dienst. Am bekanntesten und auch am gefürchtetsten ist der Injektor zum Speisen des Kessels. Bei richtiger Konstruktion und Fertigung sowie bei kenntnisreicher und liebevoller Behandlung arbeitet ein Injektor sehr zuverlässig. Bereits bei kleinen Störungen kann er störrisch werden wie ein Esel.

Grundsätzlich sind die Strömungsvorgänge im Modell und im Original gleich oder zumindest ähnlich. In vielen Fällen ist die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des Verkleinerungsmaßstabes geringer als beim Original. Als Richtwert für die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit kann der Maßstab selbst gelten. Beim Modell sind die Volumenströme (Wasser- und Dampfverbrauch pro Stunde) in der Regel um die dritte Potenz geringer als beim Original. Zum Beispiel weist eine 5-Zoll-Lokomotive im Maßstab 1:10 um den Faktor $10^3 = 1000$ kleinere Volumenströme und um den Faktor $10^2 = 100$ kleinere Querschnittsflächen auf. Die Volumenströme im Blasrohr einer Modell-Lokomotive sind so gering, dass der beim Original gefürchtete Rückdruck auf die Kolben der Dampfmaschine vernachlässigbar klein wird. Damit geht allerdings der geliebte Auspuffschlag beim Modell im Vergleich zum Original weitgehend verloren.

Bei den in den Modell-Dampflokomotiven häufig eingesetzten Injektoren (Fördern des Kesselspeisewassers) und Ejektoren (Erzeugen von Saugluft für „Vakuumbremsen“) werden wie beim Original Dampfdüsen (Laval-Düsen) eingesetzt, die mit Überschallgeschwindigkeit arbeiten. Die Strömungsprozesse sind im Original und im Modell ähnlich. Nur die Strömungsquerschnitte sind beim Modell wesentlich kleiner. Durchmesser in Rohren und Düsen betragen teilweise

weniger als 0,5 mm. Diese engen Querschnitte verursachen beim Modell Probleme der unterschiedlichsten Art, die beim Original in dieser Form nicht auftreten. Es liegt auf der Hand, dass Schmutzpartikel im Speisewasser und im Dampf beim Wasserüberreißen diese engen Strömungskanäle verstopfen können. Bereits eine geringfügige Verkalkung der Düsenoberfläche kann sich im Betrieb im Modell störender auswirken als beim Original. Trotz der dreckigen Umgebung eines Dampflokotiv-Modells durch Kohlenstaub und Ruß ist im Inneren äußerste Sauberkeit gefragt. Deckel von Wassertank und Ölbehälter sind möglichst verschlossen zu halten, um einfallenden Dreck zu vermeiden. Wo immer möglich, sollten Strömungsmedien (Wasser, Dampf, Öl) geeignet gefiltert werden. Wasserüberreißen kann man weitgehend vermeiden, indem man den Wasserstand nicht zu hoch ansteigen lässt.

Ein weiteres Problem der geringen Durchmesser in Strömungskanälen von Düsen und Diffusoren von Dampflokotiv-Modellen besteht in deren Herstellung. Es handelt sich zwar in der Regel um symmetrische Drehteile, aber die Fertigung der komplizierten Formdrehstähe für die extrem kleinen stromlinienförmigen Strömungskanäle ist nicht einfach. Die Ausschussrate von in Kleinserien hergestellten Injektoren soll mehr als 30 % betragen. Eine bekannte britische Vertriebsfirma für Dampfmodellbahn-Zubehör weist extra darauf hin, dass die von ihr gelieferten Injektoren vor der Auslieferung individuell auf Funktionsfähigkeit hin untersucht werden.

Der Umgang mit Überschallströmungen wird den meisten Lesern fremd sein. Diese Vorgänge vermutet der Leser eher bei Überschallflugzeugen. Dieses Buch versucht, mit einem Minimum an theoretischem Aufwand auf die betrieblich wichtigen Eigenschaften von Überschallströmungen einzugehen; denn ein Injektor, der daran gehindert wird, den Überschallzustand zu erreichen, funktioniert unbefriedigend oder gar nicht.

Strömungen sind immer mit Reibung verbunden. Die Original-Lokomotiven weisen in der Regel einen Düsendurchmesser von mehr als 6 mm auf, und der Reibungseinfluss kann mit 5 bis 10 % pauschal berücksichtigt werden. Bei den extrem kleinen Durchmessern in den Düsen von Miniatur-Injektoren spielt die Grenzschicht für die Funktion bereits eine wichtige Rolle. In diesem Bereich gibt es in der Wissenschaft noch heute störende Kenntnislücken.

Dieses Buch soll einige Grundkenntnisse zum Verständnis der Strömungsvorgänge in Düsen und Diffusoren vermitteln und mithelfen, Pannen im Betrieb von Dampflokotiven zu vermeiden. Ziel dieses Buches ist es, das Verständnis der Strömungsvorgänge in unseren Lokotivmodellen zu vertiefen, um mehr Freude an der störungsfreien Funktion zu haben. Es wird versucht, einfache theoretische Modelle aufzustellen, die eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Praxis aufweisen. Dem Philosophen Immanuel Kant (1724–1804) wird das Zitat

Nichts ist praktischer als eine gute Theorie

zugeschrieben. Ich bin davon überzeugt, dass Kant recht hat. Ein wesentliches Ziel dieses Buches besteht darin, die physikalisch technischen Strömungsprozesse in den Dampflokotiv-Modellen verständlich und berechenbar zu machen und ihnen den unberechtigten Mythos zu nehmen.

Auch der bekannte Praktiker Leopold Niederstrasser [12] ist in seinem Buch *Leitfaden für den Lokomotivdienst* davon überzeugt, dass die Vorgänge bei der Dampferzeugung, in der Dampfmaschine und in der Steuerung ausführlich behandelt werden müssen; denn ohne die nötige Kenntnis dieser Dinge wird der Lokomotivführer nicht in der Lage sein, die Lokomotive mit dem richtigen Verständnis zu behandeln.

Wegen des begrenzten Umfanges können allerdings nur einige ausgewählte Aspekte behandelt werden.

2. Grundeigenschaften von Strömungen

Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen sind extrem komplexe Vorgänge, die selbst Fachleuten nicht selten Verständnisprobleme bereiten können. Bereits 1738 hat der Schweizer Mathematiker und Physiker Daniel Bernoulli den Satz von der Gleichwertigkeit der verschiedenen Energien in der Strömungsmechanik formuliert. Seit dieser Zeit wird intensiv versucht, Strömungsvorgänge mit physikalischen Ansätzen so weit zu beschreiben, dass sie mathematisch behandelbar werden. Das Fachgebiet der Strömungsmechanik ist inzwischen sehr umfangreich geworden und gilt auch heute noch als eine der schwierigsten technisch-wissenschaftlichen Disziplinen, in der es immer noch sehr viel zu erforschen und entwickeln gibt. Besonders die Entwicklung von Flugzeugen ist extrem aufwendig und kostspielig, wobei die Strömungsmechanik eine dominierende Rolle spielt. Das wäre ein guter Grund, dieses Thema hier zu meiden, da der Fokus der Gartenbahner primär auf dem Bau und dem Betrieb von Gartenbahnen liegt. Allerdings lassen sich viele Strömungsvorgänge sinnvoll vereinfachen, ohne zu sehr an Genauigkeit zu verlieren. Häufig sind bereits mit sehr vereinfachten Vorstellungen (theoretischen Modellen) Genauigkeiten von 95 % und mehr zu erreichen. Typische und wirkungsvolle vereinfachende Annahmen sind: reibungsfreie Strömungen, energetisch verlustfreie (adiabate) Strömungen sowie inkompressible Strömungen. Die verwendeten Formeln werden hier aber nicht hergeleitet, sondern nur die für die Anwendung hilfreichen Formeln angegeben. Wer Interesse an einer konsequenten Herleitung hat, sollte die entsprechende Literatur zu Rate ziehen. Diejenigen, denen das Lesen von Formeln kein Vergnügen bereitet, können sie auch völlig ignorieren. Mir persönlich sagen Formeln häufig mehr als tausend Worte. Alle Informationen sind im Text und den Bildern enthalten. Eine komprimierte Darstellung von strömungsmechanischen und thermodynamischen Vorgängen findet sich in der „Hütte“ [5,6] und eine ausführlichere Variante in den Lehrbüchern über Thermodynamik von E. Schmidt [1] und Puschmann/Drath [2].

Alle Maße werden im gesetzlich gültigen Meter-Kilogramm-Sekunden-System m-kg-s (SI-Einheiten) angegeben. Druck und Temperatur werden absolut in Pascal bzw. Kelvin definiert. Ursprünglich war für dieses Buch geplant, die Maße in den zwar nicht mehr gültigen, aber dem Modellbauer geläufigen Ingenieurs-Einheiten anzugeben. Mit den Ingenieurs-Einheiten werden die Berechnungen der Gleichungen aber zum Teil so unübersichtlich und fehleranfällig, dass ich mich

während der Arbeit an diesem Buch entschlossen habe, nahezu alle Berechnungen in SI-Einheiten durchzuführen und nur dort, wo sinnvoll, in die vertrauteren Ingenieureinheiten umzurechnen. Nur in abgeschlossenen Bereichen, wie z. B. bei der Erwärmung des Wassers, werden Kalorien anstelle von Joule verwendet. Ein weiteres in sich abgeschlossenes System ist auch die Behandlung von Drücken kleiner als dem Atmosphärendruck. Hier werden Unterdrücke Δp verwendet mit den Einheiten „bar“ und „Millimeter Wassersäule“ bzw. mm WS. Als Anzeigeinstrumente für Druck (Kesseldruck, Schieberkastendruck, Unterdruck) werden Manometer eingesetzt, die den Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre anzeigen. Obwohl sich der Atmosphärendruck mit der Höhe über Normal-Null in Meereshöhe und mit der Wetterlage (Hochdruck und Tiefdruck) ändert, ist es für die in diesem Buch angestrebte Genauigkeit von ca. 5% ausreichend, einen Referenz-Atmosphärendruck von $p_{at} = 1 \text{ bar}$ zu definieren. Damit vereinfachen sich viele Beschreibungen und Rechnungen. In den üblichen Manometern wird der Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre angezeigt, wie z. B. beim Kesseldruck. Um gegenüber dem Absolutdruck Verwechslungen zu vermeiden, wird der Differenzdruck mit dem Index $\bar{u}$ versehen. Zum Beispiel weist ein am Kessel-Manometer abgelesener Differenzdruck $p_K = 6 \text{ bar}_{\bar{u}}$ einen Absolutdruck $p_K = 1 \text{ bar} + 6 \text{ bar}_{\bar{u}} = 7 \text{ bar}$ auf.

In Anhang A5 sind die Bezeichnungen, Symbole, Abkürzungen und Maßeinheiten zum Nachschlagen zusammengestellt.

Verlustfreie Strömungen

In verlustfreien Strömungen geht per Definition keine **Energie** und keine **Masse** verloren.

Energie:

Drei Energiearten sind neben der Wärmeenergie im Wesentlichen für die Strömungsvorgänge in Dampflokomotiven von Interesse:

Geschwindigkeitsenergie	$1/2 w^2$
Druckenergie	p/ρ
Gewichtsenergie	gh

Die spezifische Gesamtenergie (Energie bezogen auf die Masse)

$$e_{tot} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}w^2 + gh \quad (2.1)$$

ist unter den vereinbarten Annahmen unveränderlich und überall im System gleich. Dieses ist eine für unsere Aufgabe nützliche Formulierung des Bernoulli'schen Energiesatzes.