

# Berechnung und Verhalten von Wasserrohrkesseln

Ein graphisches Verfahren  
zum raschen Berechnen von Dampfkesseln nebst einer  
Untersuchung über ihr Verhalten im Betriebe

von

**Friedrich Münzinger**

Mit 127 Abbildungen und 6 Zahlentafeln im Text  
sowie 20 Kurventafeln in der Mappe



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1929

ISBN 978-3-662-27802-4 ISBN 978-3-662-29302-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-29302-7

**Alle Rechte, besonders das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

**Copyright 1929 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1929**

## Vorwort.

Der Wasserrohrkesselbau hat in den letzten 15 Jahren eine so stürmische Entwicklung durchgemacht, daß, wer sie nicht miterlebte, sich nur schwer vorstellen kann, wieviel Kopfzerbrechen noch vor kurzer Zeit heute selbstverständliche Dinge verursachten. Als um das Jahr 1910 herum Steilrohrkessel aufkamen und man zu größeren Kettenrosten überging, waren besonders zwei Punkte unklar: die zweckmäßigste Gestaltung des Feuerraumes und der Wasserumlauf. Ich bekam diesen Übelstand gleich beim Bau der ersten großen Kesselanlage, für die ich verantwortlich war, schwer zu fühlen. Ihre 64 Kessel waren nach 8 verschiedenen „Systemen“ gebaut, und es galt, sich in dem Wust einander widersprechender, von den Firmen mit großer Bestimmtheit vertretener Ansichten über den Einfluß von Rohrlänge, -anordnung, -durchmesser und -form ein eigenes Urteil zu bilden. Da man den Wasserumlauf damals (1915) noch nicht rechnerisch verfolgen konnte und fast keine Erfahrungen vorlagen, war das „konstruktive Gefühl“ die einzige Hilfe. Dieser höchst unerwünschte Zustand veranlaßte mich, eine Theorie des Wasserumlaufes<sup>a\*</sup> aufzustellen.

Etwa gleichzeitig machte die feuerfeste Einmauerung und das Durchbrennen von Wasserrohren solche Schwierigkeiten, daß ich aus einer ähnlichen Zwangslage heraus ein rechnerisch-graphisches Verfahren zum Untersuchen der Vorgänge in Feuerräumen<sup>b</sup> entwickelte und mit seiner Hilfe eine andere Formgebung schon zu einer Zeit empfahl, als noch starr an den engen backofenartigen Verbrennungskammern festgehalten wurde.

Beide Verfahren haben mich in der Folge vor vielen Enttäuschungen geschützt.

Auch das in diesem Buch beschriebene Rechnungsverfahren entstand unter dem Zwang der Not. Das Auftauchen der Staubfeuerungen und anderer Neuheiten, wie hoher Luft- und Speisewasservorwärmung, Auskleidung des Feuerraumes mit Kühlflächen, Verwendung von Turbinenanzapfdampf zum Erwärmen des Speisewassers, Übergang zu hohen Dampfdrücken usw., hat die Bemessung von Dampfkesseln ungleich schwieriger gemacht als in früheren Zeiten. Wohl gibt es außer Faustformeln und Erfahrungswerten auf exakten Untersuchungen beruhende Formeln für die Wärmeübertragung usw. Sie eignen sich aber, ähnlich wie die ausgezeichneten Untersuchungen der Vorgänge in Feuerräumen von Professor Wohlenberg infolge ihres verwickelten Aufbaues und weil sie Vertrautsein mit einer Reihe wenig geläufiger Größen verlangen, nicht für den täglichen Gebrauch. Denn bei sehr vielen Kesselberechnungen handelt es sich nicht um die einmalige Lösung weniger Gleichungen, sondern um das Finden eines brauchbaren Kompromisses durch wiederholtes probeweises Ändern oft mehrerer Ausgangswerte, wodurch die Rechnungen überaus zeitraubend und unübersichtlich werden.

Ich habe daher in den letzten 3 Jahren ein neuartiges Verfahren ausgearbeitet, das mit Hilfe von Kurventafeln selbst sehr verwickelte Zusammenhänge schnell zu klären gestattet. Die Schwierigkeit, auch Überhitzer und Economiser organisch in das Verfahren einzugliedern (ihre Größe hängt u. a. vom Kesselwirkungsgrad und der Erzeugungswärme ab, die unter sonst gleichen Verhältnissen, z. B. gleicher Überhitzung und

<sup>a</sup> 14, 15, S. 64.    <sup>b</sup> 15, S. 4.

\* Die Ziffern in den Fußnoten beziehen sich auf die Nummernfolge des Literaturverzeichnisses S. 124.

gleicher Dampferzeugung, sehr verschieden sein können), wurde durch Einführen der Verdampfungsziffer in die betreffenden Kurventafeln überwunden.

Wenngleich das neue Verfahren ein wesentlicher Fortschritt ist, so ist es doch voraussichtlich noch verbesserungsfähig. Ich habe daher geschwankt, ob ich vor seiner Veröffentlichung nicht durch langen Gebrauch im eigenen Bureau weitere Vervollkommnungen versuchen soll, bin aber zur Überzeugung gekommen, daß die geeignetste Form am schnellsten gefunden wird, wenn weite Kreise Gelegenheit haben, es selber zu erproben. Für Verbesserungsvorschläge und den Hinweis auf etwaige Fehler wäre ich daher zu großem Danke verpflichtet.

Ich möchte hier aber gleichzeitig auf die Grenzen hinweisen, die ihm wie ähnlichen Verfahren infolge der beschränkten Genauigkeit der benutzten Ausgangswerte und dadurch gezogen sind, daß ein verwickelter Vorgang, bei dem sich oft zahlreiche Einflüsse überdecken und aufheben, durch starre mathematische Formeln erfaßt werden muß. Die Schwierigkeit der rechnerischen Erfassung liegt daher öfter weniger in der eigentlichen mathematischen Behandlung als in der richtigen Formulierung ihrer Voraussetzungen.

Vorgänge in Dampfkesseln können rechnerisch nicht so zuverlässig verfolgt werden wie etwa elektrische. Zudem sind manche Erscheinungen, wie z. B. die Strahlung in Feuerräumen, noch wenig erforscht. Während aber die hierdurch bedingten Mängel mit zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnis immer mehr verschwinden, wird die Schwierigkeit der Anwendung starrer Formeln auf die zahllosen, mathematisch kaum faßbaren Ausführungsformen wohl immer bleiben. Man bedenke z. B. welche verwickelte Gestalt viele Feuerräume haben und wie verschieden die Wärme in ihnen entbunden wird, je nachdem ob alle Verbrennungsluft zusammen mit dem Kohlenstaub eingeblasen oder allmählich zugeführt wird und ob die Verbrennung in gegeneinander blasenden Wirbelbrennern oder in U-förmiger, fast wirbelfreier Flamme erfolgt.

Auch das neue Verfahren kann daher nur eines der zahlreichen Hilfsmittel sein, deren sich der Ingenieur bedienen muß, um zum Ziele zu kommen. Ingenieurtätigkeit ist eben keine Wissenschaft wie Mathematik und kann die ihr gestellten Aufgaben nicht lediglich durch Berechnung lösen. Insbesondere kann auch das beste Rechenverfahren Mangel an konstruktivem Geschick wohl mildern, aber nicht ersetzen. Beim Entwerfen von Maschinen wird daher der „geborene Konstrukteur“ ohne tiefere wissenschaftliche Bildung einem vorzüglichen, aber konstruktiv nicht veranlagten Theoretiker immer überlegen sein. Aber je verwickelter eine Maschine und je schärfer der Konkurrenzkampf wird, um so weniger kann auch der beste Konstrukteur ohne zuverlässige Vorausberechnung auskommen, wenn er aus seinen Schöpfungen das Letzte herausholen will. Hat ein Ingenieur außer gutem wissenschaftlichen Rüstzeug noch jene seltene Gabe, die man wohl am besten mit konstruktivem Gefühl und gesundem Menschenverstand bezeichnen kann, so wird er auch in verwickelten Fällen Theorie und Praxis richtig miteinander zu verbinden verstehen. Aber einen Kessel ohne dauernde Prüfung, wie die Rechnung mit der rauhen Wirklichkeit auf dem Zeichenbrett und in der Werkstätte zusammenpaßt, „berechnen“ zu wollen, wäre ein Unding und spräche bei Fehlschlägen nicht gegen das benutzte Verfahren sondern seinen verfehlten Gebrauch.

Übrigens spielt bei sehr vielen Berechnungen von Dampfkesseln weniger große absolute Genauigkeit als der Umstand eine Rolle, daß die ermittelten Werte in ihrem Verhältnis zueinander richtig sind und daß etwaige Fehler in derselben Richtung liegen.

Der theoretische Teil des Buches wurde möglichst kurz, aber doch so ausführlich behandelt, als es zum Verständnis der verwickelten Vorgänge und zum richtigen Gebrauch der Rechentafeln nötig ist. Für Leser, die tiefer in die Materie eindringen wollen, ist der Literaturnachweis bestimmt.

Ich hatte ursprünglich vor, lediglich Entstehung und Gebrauch der Tafeln zu schildern, habe aber dann noch einen Abschnitt hinzugefügt, der zahlreiche, durchweg aus der Praxis stammende Fragen behandelt. Der Absicht, die Aufmerksamkeit des Lesers

immer wieder auf wichtige, bisher wenig bekannte Zusammenhänge oder auf verbreitete Irrtümer zu lenken, ist es zuzuschreiben, daß manche Dinge wiederholt und in verschiedenen Abschnitten behandelt wurden. Graphischen Darstellungen wurde durchweg der Vorzug gegeben, weil ein Bild sich dem Gedächtnis besser einprägt und länger haftet als Worte.

Wenn ich weiter vorn das Erscheinen dieses Buches zum Anlaß einiger Ausführungen über Theorie und Praxis genommen habe, so möchte ich hier noch kurz auf eine interessante Erscheinung der letzten Jahre hinweisen, nämlich auf den zunehmenden Einfluß von Persönlichkeiten, die nicht aus dem Dampfkesselbau hervorgegangen, also keine „Spezialisten“ sind, auf die Entwicklung dieses Zweiges der Technik. Er ist sowohl auf theoretisch-wissenschaftlichem als auch praktisch-konstruktivem Gebiet sehr stark und im Maschinenbau zur Zeit wohl einzig dastehend. Besonders infolge der Einführung der Kohlenstaubfeuerungen sind großenteils veranlaßt durch Nicht-Kesselbauer neue Maschinenelemente (wie z. B. wassergekühlte Feuerräume) und neue Bauformen (wie der Dampfgenerator) entstanden, zu denen sich in der letzten Zeit Dampfzerzeuger wie der Löfflerkessel und der Bensonkessel gesellten, deren Arbeitsweise und Aufbau grundsätzlich neu sind. Diese Vorgänge erinnern an die Zeit vor etwa 25 Jahren, als die ersten erfolgreichen Großgasmaschinen entstanden, und die Zukunft muß zeigen, ob der Einfluß von Außenseitern im Kesselbau ähnliche Fortschritte zeitigt wie seinerzeit bei den Gasmaschinen. Der „reine Spezialist“ ist eben allzu leicht geneigt, gewisse Dinge, die er von Jugend auf kennt, als etwas Unabänderliches, gewissermaßen Sakrosanktes, anzusehen, die es durchaus nicht sind, und gerade ausgeprägte „Spezialisten“ werden nicht selten dadurch von Fortschritten abgehalten, daß ihnen ihre vielseitigen Erfahrungen das Herausbringen von etwas grundsätzlich Neuem als ein zu großes Wagnis erscheinen lassen, während ein mit der Materie weniger vertrauter Ingenieur vor der Neuerung oft deshalb nicht zurückschreckt, weil er sich der damit verbundenen Gefahren unter Umständen gar nicht bewußt ist. Zweifellos ist der erstere Fall aber dem Fortschritt hinderlicher und sollte besonders für junge Ingenieure Veranlassung sein, sich unablässig zu bemühen, an eine Aufgabe möglichst voraussetzungslos heranzugehen und immer wieder zu prüfen, was an einer Sache wesentlich und unabänderlich ist und was nicht. Auch hierbei können ihm einfache und übersichtliche Berechnungsverfahren gute Dienste leisten.

Aber selbst innerhalb des Dampfkesselbaues kommt man heute ohne weitgehende Spezialisierung nicht mehr aus, weil er einen solchen Umfang erreicht hat, daß ein einzelner die Unsumme von Wissen und Erfahrung, ohne die ein geschäftlicher Erfolg unmöglich ist, nicht mehr in sich aufnehmen kann. Um so wichtiger ist es daher, bereits bei den Studierenden Verständnis für die großen Zusammenhänge zu erwecken und sie mit jenem lebendigen Geiste zu erfüllen, der allein die Gefahren weitgehender Spezialisierung vermeidet, nämlich das Unverständnis für fremde Bedürfnisse, das Unvermögen, Zufälliges von Grundsätzlichem zu unterscheiden und die Unfähigkeit oder Abneigung, die zum Erreichen eines großen gemeinsamen Zieles erforderlichen Konzessionen zu machen. Die unvermeidliche Spezialisierung ist ein deutliches Zeichen dafür wie eng heute der Wirkungskreis des einzelnen geworden ist und wie viele mit helfen müssen, um ein größeres Gebiet wissenschaftlich zu erschließen und umfassende Verbesserungen durchzuführen.

Der Dampfkesselbau könnte gefördert werden, wenn, wie ich dies schon im Jahre 1922 empfahl, sich unsere wissenschaftlichen Institute noch mehr mit Dampfkesseln beschäftigen und besonders die für die Praxis überaus wichtigen Vorgänge in Feuerräumen, z. B. auch mit Hilfe der von mir beschriebenen Wärmesonde<sup>a</sup> erforschen würden. Vor allem sollten einige Staubfeuerungen möglichst einfacher Form systematisch untersucht werden, weil anzunehmen ist, daß dann durch geeignete Rechenverfahren auch die Vorgänge in unregelmäßig gestalteten Feuerkammern auf einfache Weise genügend

genau erfaßt werden können. Jedenfalls eröffnet sich hier versuchstechnisch und mathematisch geschulten Ingenieuren ein lohnendes Betätigungsgebiet.

Herrn Professor Wohlenberg von der Yale Universität bin ich für seine wertvollen Auskünfte und dafür zu besonderem Dank verpflichtet, daß er mir mit großer Freundlichkeit einige Koeffizienten angab, die ich zum Aufzeichnen der die Vorgänge in Feuerräumen betreffenden, auf seinen Untersuchungen beruhenden Tafeln 17—20 brauchte.

Den Herren Dipl.-Ing. Andritzky, Pachmayr, Schmidt und Weidmann, die mich bei Durchführung der Berechnungen unterstützten, insbesondere aber Herrn Dipl.-Ing. Blümel, der mit vorbildlichem Eifer die immer wieder erforderlichen Änderungen durchführte, möchte ich auch an dieser Stelle meinen besten Dank aussprechen.

Der Verlagsbuchhandlung danke ich für die Bereitwilligkeit, mit der sie meine Wünsche erfüllte und die Sorgfalt, die sie der Ausstattung des Buches zuteil werden ließ. Leider haben die Kurventafeln das Buch recht verteuert, ich glaube aber, daß sich die Mehrausgabe lohnt, weil bei ihrem Abdruck im Text seine Brauchbarkeit gelitten hätte.

Zum Schluß möchte ich wünschen, daß das Buch zur Vertiefung der bildhaft klaren Vorstellung der Vorgänge in Dampfkesseln beiträgt und recht viele Ingenieure in einer ihrer wichtigsten Aufgaben unterstützt: im Ersatz von Vermutungen und dem Zufall unterworfenen Schätzungen durch gesetzmäßige Erkenntnis und rechnerische Vorausbestimmung. Etwaige Unebenheiten und Lücken bitte ich mit dem Zwang, eine so zeitraubende Veröffentlichung neben einer angestrengten beruflichen Tätigkeit herauszubringen, zu entschuldigen.

Berlin, im Mai 1929.

**Münzinger.**

## Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung . . . . .	1
II. Theoretischer, wärmetechnischer Teil . . . . .	5
a) Allgemeines . . . . .	5
b) Wärmeübergang durch Berührung . . . . .	5
c) Wärmeübergang durch Strahlung . . . . .	8
III. Entstehen und Benutzen der Kurventafeln . . . . .	13
IV. Das Verhalten von Dampferzeugern . . . . .	39
a) Einleitung . . . . .	39
b) Das Verhalten von Feuerräumen . . . . .	49
1. Einleitung . . . . .	49
2. Wärmeübertragung im Feuerraum . . . . .	52
3. Wärmebilanz des Feuerraumes . . . . .	53
4. Einfluß der Kohlenzusammensetzung . . . . .	55
5. Einfluß der Temperatur der Verbrennungsluft . . . . .	56
6. Verschiedene spezifische Feuerraumbelastung bei gleicher Gesamtbelastung . . . . .	58
7. Einfluß der Feuerungsart . . . . .	59
8. Einfluß armierter Kühlflächen . . . . .	60
9. Wärmebelastung von Rohren durch Strahlung vom Feuerraum . . . . .	64
10. Einfluß von Kesselstein bei hoher Heizflächenbelastung . . . . .	67
11. Andere Verfahren zur Ermittlung der Feuerraumtemperatur . . . . .	68
12. Ermittlung der theoretischen Verbrennungstemperatur . . . . .	71
c) Das Verhalten von Berührungsheizflächen . . . . .	71
1. Einleitung . . . . .	71
2. Einfluß des Rohrdurchmessers auf die Wärmedurchgangszahl . . . . .	72
3. Einfluß der Zusammensetzung der Rauchgase und der Kohle auf die Wärmedurchgangszahl . . . . .	72
4. Einfluß der Rauchgasgeschwindigkeit und des CO <sub>2</sub> -Gehaltes auf die Berührungsheizfläche . . . . .	76
5. Einfluß des Kesseldruckes auf die Berührungsheizfläche . . . . .	77
d) Das Verhalten ganzer Kessel . . . . .	78
1. Unterer und oberer Heizwert (Verbrennungswärme) . . . . .	78
2. Einfluß des Brennstoffes . . . . .	82
3. Einfluß der Vorheizfläche . . . . .	83
4. Einfluß des mit der Belastung veränderlichen CO <sub>2</sub> -Gehaltes der Rauchgase . . . . .	84
5. Einfluß der Nachheizfläche . . . . .	85
6. Einfluß von Nachverbrennungen . . . . .	85
7. Berührungüberhitzer und Strahlungsüberhitzer . . . . .	86
8. Abhilfe bei unrichtiger Überhitzung . . . . .	88
9. Einfluß der Speisewassertemperatur auf die Überhitzung . . . . .	92
10. Höchstleistung ganzer Dampfkesselheizflächen . . . . .	93
11. Die Einmauerung . . . . .	97
12. Zugverluste und Kraftbedarf der Hilfsmaschinen . . . . .	105
13. Kosten von Kesselanlagen . . . . .	113
V. Anhang . . . . .	119
a) Umrechnungstabelle von amerikanischen (englischen) in deutsche Maße und umgekehrt . . . . .	119
b) Buchstaben- und Formelverzeichnis . . . . .	120
c) Literaturverzeichnis . . . . .	124

### **Zur Beachtung.**

**Eine Zusammenstellung und Erklärung sämtlicher im Buch  
und auf den Kurventafeln benutzter Buchstabenbezeichnungen  
befindet sich auf den Seiten 120 bis 122.**