

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 11

Artikel: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen: neue Methoden zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades
Autor: Nussbaumer, Thomas / Good, Jürgen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78403>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

aber festgehalten werden, dass das Holz zumindest volumenmässig zur Verfüllung des Brückenquerschnitts beigetragen hat.

Schliesslich sei hier noch auf die Frage nach Interventionsmöglichkeiten während dem Ereignis eingegangen. Alle Personen, die sich in der kritischen Phase vor der Überschwemmung im Bereich der Saltinabrücke aufhielten, waren sich letztlich nicht bewusst, was kurz darauf geschehen würde. Hätten mehr Mittel, insbesondere mehr Baumaschinen, zur Verfügung gestanden, so hätte mit diesen der Ablauf des Ereignisses kaum wesentlich beeinflusst werden können. Es ist nicht vorstellbar, dass einige Bagger den Geschiebeanfall von über 1 t/s bewältigen und so die Ablagerungen unter der Brücke hätten verhindern können. Auch ist es fraglich, ob bei den hohen Fliessgeschwindigkeiten von über 4 m/s oberhalb der Brücke Bagger ihre Schaufeln gefahrlos in die Saltina hätten eintauchen können. Wesentlich zum Ausmass der Schäden beigetragen hat die überhöhte Lage des ausgebauten Gerinnes der Saltina auf ihrem Schwemmkegel sowie die Position der Saltinabrücke. Alle Strassen,

die von der Brücke wegführen, weisen ein Gefälle in Richtung der besiedelten Gebiete auf. Das austretende Wasser konnte nirgends mehr in die Saltina zurückfliessen und bewirkte so die verheerenden Schäden.

Schlussbemerkung

Die Saltinabrücke stellt in der Schweiz keinen Einzelfall dar, sind doch aufgrund der historischen Entwicklung die Siedlungen in den grossen Flusstälern häufig auf den Schwemmkegeln seitlicher Zuflüsse zu finden. Die topographische Situation und die rasante Siedlungsentwicklung in Brig-Glis, welche letztlich massgebend zur Vergrößerung des Schadenpotentials beigetragen haben, sind nur ein typisches Beispiel von vielen. Grundsätzlich könnten solche extreme Gefährdungen durch planerische Massnahmen ausgeschlossen oder reduziert werden. Diesen Punkten ist aber in der Schweiz bisher kaum Beachtung geschenkt worden. Als Ausnahme seien hier die Lawinengefahrenzonenpläne genannt, welche zu Bauverboten in gefährdeten Gebieten geführt haben. Die Problematik der

Berücksichtigung der vom Wasser ausgehenden Gefahren in der Raumplanung wird erst jetzt durch eine vom Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) eingesetzte Arbeitsgruppe behandelt, welche dazu dem Bundesrat entsprechende Richtlinien unterbreiten soll. Bereits die vom BWW und der Landeshydrologie geleitete Ursachenanalyse der Unwetterschäden von 1987 [7] kam unter anderem zum Schluss, dass die rasche Bauentwicklung der letzten Jahrzehnte das Schadenausmass während solchen Ereignissen erheblich vergrössert hat. Bisher wurden somit die vom Hochwasser ausgehenden Gefahren bei der baulichen Entwicklung von Siedlungsgebieten generell zu wenig beachtet.

Adressen der Verfasser: *G.R. Bezzola*, dipl. Bau-Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich; *J. Abegg*, dipl. Kult.-Ing. ETH, Ingenieurbüro Schälchli und Abegg, Stadelhoferstrasse 40, 8001 Zürich (vormals Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich) und *PD Dr. M. Jäggi*, dipl. Kult.-Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen

Neue Methode zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades

Im vorliegenden Beitrag wird eine neue Formel für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad bei Holzfeuerungen hergeleitet. Aus der exakten Berechnung werden eine einfache Formel und eine grafische Bestimmungsmethode abgeleitet. Die konsequente Anwendung der hergeleiteten Formeln soll zur Vereinheitlichung der Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen führen und die verschiedenen Berechnungsmethoden der einzelnen Prüfinstitute ersetzen.

Bis anhin werden an den verschiedenen Prüfinstituten für Holzfeuerungen unterschiedliche Methoden zur Berech-

VON THOMAS NUSSBAUMER
UND JÜRGEN GOOD,
ZÜRICH

nung der thermischen und chemischen Abgasverluste verwendet [1]. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, dass die verschiedenen Berechnungsverfahren bei hohem Kohlenmonoxidgehalt im Abgas zu unterschiedlichen Werten führen können [2].

Obwohl die zahlenmässigen Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden nicht allzu gross sind, führt die Anwendung verschiedener Formeln doch immer wieder zu Diskussionen bei der Interpretation von Versuchsergebnissen. Da keine einheitliche Berechnungsmethode existiert, ist daher ein Vergleich von Messungen verschiedener Prüfinstitute schwierig. Die Herleitung der heute verwendeten Formeln und Zahlenwerte ist zudem teilweise nicht in allen Punkten nachvollziehbar. Im weiteren ist insbesondere die Berechnung nach DIN 4702 recht aufwen-

dig und deshalb für eine rasche und einfache Bestimmung beispielsweise bei Messungen an Anlagen in der Praxis nur bedingt geeignet.

Im Rahmen des DIANE-Projekts Klein-Holzfeuerungen wurde in der hier dargelegten Arbeit eine neue Formel zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen hergeleitet. Die Herleitung sowie die exakte Bestimmungsmethode sind im Schlussbericht [2] ausgeführt.

Ziel der genannten Arbeit und dieses Beitrages ist es, eine zuverlässige und einfache Methode zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen herzuleiten. Die vorgestellte Methode dient gleichzeitig als Vorschlag für eine Vereinheitlichung der Wirkungsgradberechnung.

Vorgehen

Ausgehend von der Verbrennungsgleichung von Holz wird in der vorgestellten Arbeit die Berechnung der thermischen und chemischen Abgasverluste hergeleitet. Die neue Formel wird mit der Berechnungsmethode nach DIN 4702 sowie mit der an der EMPA Dü-

$$\eta f = 100 - V_{therm} - V_{chem} \quad [\%]$$

wobei: V_{therm} = thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase [%]
 V_{chem} = chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung [%]

Thermische Verluste V_{therm}

$$V_{therm} = \frac{(T_A - T_U) \left(1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u \right)}{\frac{h_{U,atro}}{100} - 0.25 u} \quad [\%]$$

Chemische Verluste V_{chem}

$$V_{chem} = \frac{CO}{CO_2 + CO} \frac{11'800}{\frac{h_{U,atro}}{100} - 0.25 u} \quad [\%]$$

Lambda λ

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO}$$

Falls O_2 gemessen wird: $CO_2 = 0.98 (21 - O_2) - 0.61 CO$ [Vol.-%]

mit: T_A = Abgastemperatur [°C]
 T_U = Umgebungstemperatur [°C]
 CO = Kohlenmonoxidkonzentration [Vol.-%]
 CO_2 = Kohlendioxidkonzentration [Vol.-%]
 O_2 = Sauerstoffkonzentration [Vol.-%]
 u = Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz [%]
 $h_{U,atro}$ = Heizwert pro kg absolut trockenes Holz = 18'500 [kJ kg⁻¹]

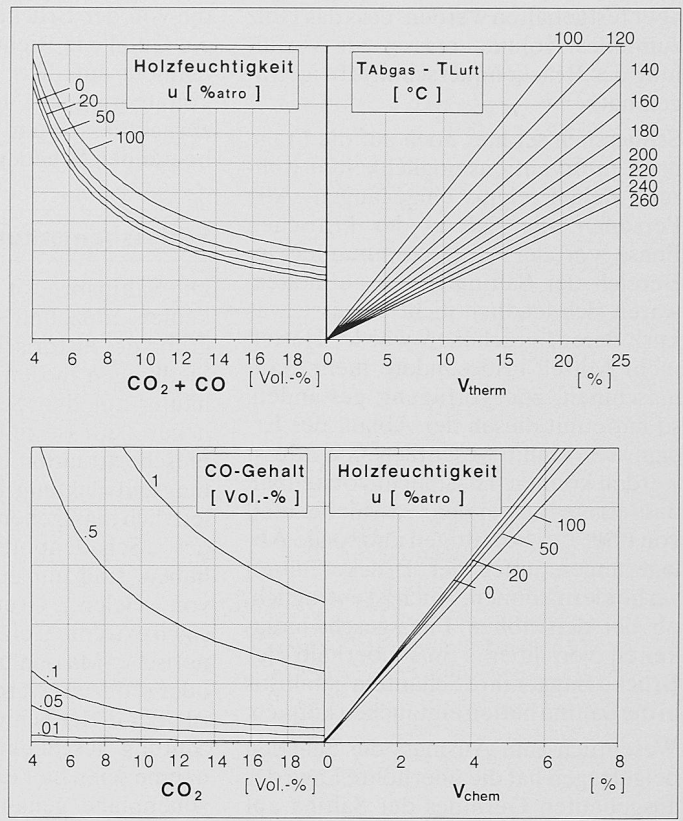


Bild 2. Nomogramm zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads, wobei $\eta f = 100 - V_{therm} - V_{chem}$ [%] = feuerungstechnischer Wirkungsgrad; V_{therm} = thermische Abgasverluste; V_{chem} = chemische Abgasverluste

Bild 1. Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads ηf nach der vereinfachten Berechnungsmethode

bendorf, an der Bundesanstalt für Landtechnik in Wieselburg und der am Ökozentrum Langenbruck verwendeten Formeln verglichen [1, 3, 4]. Die Herleitung der Berechnung beruht auf folgenden Annahmen [2, 5]:

- Vernachlässigung von Kohlenwasserstoffen und Russ im Abgas
- Abgase verhalten sich wie ideale Gase
- Zusammensetzung von Holz: CH_mO_n mit $m = 1.44$ und $n = 0.66$
- Zusammensetzung der Verbrennungsluft: 21 Vol.-% O_2 und 79 Vol.-% N_2

- Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft wird vernachlässigt
- Vernachlässigung der Stickoxide NO_x
- Verbrennung mit Luftüberschuss $\lambda \geq 1$

Damit kann die Reaktionsgleichung der Verbrennung von Holz abgeleitet werden (vgl. untenstehende Gleichung).

Im Schlussbericht wird gezeigt, wie aus der Verbrennungsgleichung die Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades abgeleitet werden kann. Im weiteren wird aus der exakten For-

mel die vereinfachte Methode (Bild 1) hergeleitet.

Es wird gezeigt, dass die Resultate der vorgestellten Berechnungsmethode sehr gut mit den Werten nach DIN übereinstimmen und die Abweichung bei typischen Abgaswerten weniger als 0.2% beträgt. Ausgehend von der exakten Berechnungsmethode wird eine vereinfachte Formel hergeleitet, die bei normalen Betriebsbedingungen einer Holzfeuerung (CO -Gehalt < 0.5 Vol.-%, CO_2 -Gehalt > 5 Vol.-%, Abgastemperatur < 400 °C) praktisch ohne Genauigkeitseinbuße gegenüber der exakten Berechnung angewendet werden kann. Die vereinfachte Formel eignet sich für eine rasche und einfache Bestimmung mit einem Taschenrechner oder zur einfachen Programmierung in einer Berechnungsroutine.

Zur grafischen Bestimmung können die aus der Formel abgeleiteten Nomogramme verwendet werden (Bild 2). Die vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode ist *wesentlich einfacher als die Bestimmung nach DIN* und der Berechnungsvorgang ist zudem in allen Punkten nachvollziehbar. Es wird deshalb vorgeschlagen, für eine einfache Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen

$$CH_mO_n + \frac{u}{100} \frac{M_{Holz}}{M_{Wasser}} H_2O + \lambda A (O_2 + \frac{79}{21} N_2) \rightarrow$$

$$(1 - \beta) CO_2 + \beta CO + \left(\frac{m}{2} + \frac{u}{100} \frac{M_{Holz}}{M_{Wasser}} \right) H_2O + \left((\lambda - 1) A + \frac{\beta}{2} \right) O_2 + \lambda A \frac{79}{21} N_2$$

wobei: M_{Wasser} = Molmasse von Wasser = 18.0 kg kmol⁻¹

A = $1 + m/4 - n/2$ (Brennstoffkonstante für den Brennstoff CH_mO_n)

u = Holzfeuchtigkeit in % atro

M_{Holz} = Molmasse von Holz $CH_{1.44}O_{0.66}$ = 24.0 kg kmol⁻¹

CO_2 = Kohlendioxidgehalt der trockenen Abgase [Vol.-%]

CO = Kohlenmonoxidgehalt der trockenen Abgase [Vol.-%]

$\beta = \frac{CO}{CO + CO_2}$

λ = Luftüberschusszahl

Literatur

- [1] Bühler, R.: Ringversuche zur Typenprüfung von Holzheizkesseln, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1992
- [2] Good, J.; Nussbaumer, Th.: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen, DIANE-Projekt Klein-Holzfeuerungen, Bundesamt für Energiewirtschaft, ENET, Bern 1993 (Bezugsquelle: ENET, Postfach 142, 3006 Bern, Tel. 031/352 19 00)
- [3] Nussbaumer, Th.: Emissionen von Holzfeuerungen, Schlussbericht NFP 12 – Projekt Nr. 4.971.0.86.12, Institut für Energietechnik, ETH Zürich 1988
- [4] Gaegauf, Ch.; Salerno, B.: Das Abbrandverhalten von Klein-Holzfeuerungen, Bundesamt für Energiewirtschaft, ENET, Bern 1991
- [5] Kerschbaumer, D.; Nussbaumer, Th.: Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, Ergänzungen, Heizung Klima 11, 1989, 107–109
- [6] Nussbaumer, Th.; Kerschbaumer, D.: Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, Heizung Klima 11, 1987, 100–105

die neu hergeleitete vereinfachte Berechnungsformel und für eine rasche grafische Bestimmung die entsprechenden Nomogramme zu verwenden.

Wenn sehr hohe Genauigkeit verlangt wird und zur Berechnung eine etwas

aufwendigere Berechnungsroutine programmiert werden kann, wird empfohlen, die hergeleitete exakte Berechnungsmethode anzuwenden. Gegenüber der vereinfachten Methode kann der Wirkungsgrad damit auch bei CO-Gehalten im Prozentbereich noch mit hoher Genauigkeit bestimmt werden – was allerdings bei Holzfeuerungen nach dem heutigem Stand der Technik kaum mehr von Bedeutung ist. Im weiteren bietet die exakte Berechnungsmethode jedoch den Vorteil, dass sie bei Kenntnis der Brennstoffzusammensetzung auf beliebige Brennstoffe übertragen werden kann. Bei Bedarf kann somit – wie am Beispiel Holz gezeigt wird – eine in weiten Bereichen gültige vereinfachte Berechnung für beliebige andere Brennstoffe hergeleitet werden.

Empfehlungen

Die vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode ist wesentlich einfacher als die Bestimmung nach DIN 4702, und der Berechnungsvorgang ist zudem einfach verständlich und nachvollziehbar. Es wird deshalb vorgeschlagen, für eine einfache Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen die vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode und für eine rasche grafische Be-

stimmung die abgebildeten Nomogramme zu verwenden (Bild 2).

Wenn sehr hohe Genauigkeit verlangt wird und zur Berechnung eine etwas aufwendigere Berechnungsroutine programmiert werden kann, wird die Anwendung der im Schlussbericht hergeleiteten exakten Berechnungsmethode empfohlen.

Für beliebige Brennstoffe kann das Berechnungsverfahren bei bekannter Brennstoffzusammensetzung analog dem am Beispiel Holz gezeigten hergeleitet werden.

Zur Mittelwertbildung des Wirkungsgrades während des Abbrandes einer diskontinuierlich beschickten Holzfeuerung wird eine mit der momentanen Leistung gewichtete Mittelwertbildung empfohlen, was beispielsweise die kontinuierliche Messung des Abgas- oder Zuluftvolumenstroms erfordert. Sofern dies nicht möglich ist, wird – analog der Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten – empfohlen, die Abgasmessdaten zuerst zu mitteln und dann die Wirkungsgradberechnung durchzuführen (zuerst mitteln und dann normieren, siehe [6]).

Adresse der Verfasser: *Thomas Nussbaumer*, Dr. sc. techn., Dipl. Masch.-Ing. ETH, und *Jürgen Good*, Dr. sc. techn., Dipl. Masch.-Ing. ETH, Verenum, Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umweltechnik, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich.

Einfluss von Belüftungsschlitz auf die Luftschalldämmung von Kaldachkonstruktionen

Der Beitrag befasst sich mit der über die Belüftungsschlitz bei Kaldächern übertragenen Schallenergie und zeigt, in welchem Masse die Luftschalldämmung von der Dachkonstruktion beeinflusst wird. Das Thema ist für die Baupraxis bedeutungsvoll, da bei den diesbezüglichen Labormessungen in der Regel die Lüftungsschlitz nicht mituntersucht werden.

Einführung

Die Bedeutung der Luftschalldämmung von Schrägdächern hat in den letzten Jahren sehr stark zugenommen, da immer mehr Dachgeschosse als Wohnraum genutzt werden. Hinzu kommen die steigenden Lärmimmissionen, das ständig wachsende Umweltbewusstsein der Bevölkerung und im weiteren natürlich noch die vom Bund im Jahre 1987 in Kraft gesetzte Lärmschutz-Verordnung (LSV), in welcher bestimmte

Mindestanforderungen in bezug auf die Luftschalldämmung der Aussenhüllen von Wohnhäusern festgelegt sind. Eine Voraussetzung zur Erfüllung dieser ge-

VON BEAT KÜHN UND
RUDOLF BLICKLE,
UNTERÄGERI

setzlich verankerten Anforderungen sind Dachkonstruktionen mit hoher Luftschalldämmung. Da sich die Luftschalldämmung von mehrschaligen Bauteilen rechnerisch nur sehr grob ab-

schätzen lässt, ist man gezwungen, die Dachkonstruktionen im Laboratorium messtechnisch zu untersuchen.

Bei den in der Baupraxis angewandten Dachkonstruktionen wird zwischen Warmdächern und Kaldächern unterschieden. Kaldachkonstruktionen weisen dabei im Gegensatz zu Warmdächern zwischen der Dämmschicht und dem Unterdach einen belüfteten Hohlraum auf, welcher über Belüftungsschlitz bei der Traufe und beim First mit der Aussenluft verbunden ist. Über diese Belüftungsschlitz wird neben Frischluft auch Schallenergie von aussen in den Hohlraum übertragen, die sich dann weiter, in mehr oder minder abgeschwächter Form, in den ans Dach angrenzenden Wohnraum fortpflanzt. Diese zusätzlich ins Dachgeschoss übertragene Schallenergie überlagert sich im weiteren mit der über die eigentliche Dachfläche übertragenen akustischen Energie und kann zur Folge haben, dass die Luftschalldämmung des Dachs vermindert wird.

Der folgende Bericht befasst sich nun eingehend mit der über die Belüftungs-