

Mehrstufiges Wirbelschichtverfahren zur Mono-Klärschlammverbrennung am Beispiel Mainz

Matthias Mann

1.	Wirbelschichttechnik.....	217
1.1.	Thermo-chemische Umsetzung in Wirbelschichtreaktoren	219
1.2.	Stickoxide im Verbrennungsprozess.....	220
2.	Konzept Wirbelschichtfeuerung	221
3.	Literatur	223

Die thermische Verwertung Mainz GmbH (TVM) realisiert am Standort des Betriebsgeländes des Zentralklärwerks Mainz eine Mono-Klärschlammverbrennungsanlage. Diese wurde in diversen Losen ausgeschrieben. Ein zentrales Los ist dabei die Wirbelschichtfeuerung/Kesselanlage/Wasserdampfkreis (LOS4), das durch die Firma Küttner GmbH & Co. KG, Essen, umgesetzt wird. Die grundlegende Auslegung der Anlagentechnik basiert dabei auf dem festgelegten Durchsatz von bis zu 37.510 t_{TS}/a.

Die Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen wird auf Basis der Wirbelschichttechnik realisiert. Hiermit wurde hausintern bereits in den 80er Jahren begonnen. Im Fokus stand zu dem Zeitpunkt die Konzeption einer Wirbelschichttechnik für den Anwendungsbereich der Gießereisandregeneration. Diese grundlegende Technik wurde weiterentwickelt und schlussendlich 2005 zu einer ersten Klärschlammverbrennungsanlage im Industriepark Infraser Gendorf umgesetzt. Bis heute wurden daraus vier realisierte Anlagen, die jeweils sehr eng an die Bedürfnisse des jeweiligen Standortes angepasst wurden. Im Jahr 2018 gaben die Firmen Küttner GmbH & Co. KG und Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik die Gründung eines gemeinsamen Unternehmens, der Küttner Martin Technology GmbH (KMT) mit Sitz in München bekannt. Geschäftszweck des neuen Unternehmens, an dem beide Partner zu je 50 % beteiligt sind und das sie gemeinsam führen, ist der Vertrieb und Bau von Anlagen zur thermischen Behandlung von kommunalem Klärschlamm.

1. Wirbelschichttechnik

In Wirbelschichtreaktoren befindet sich über einem Düsenboden ein Bett aus einem Inertmaterial. Das Bettmaterial, auch Wirbelbett genannt, wird durch ein von unten zugeführtes Gas fluidisiert. Darunter wird der Zustand verstanden, der sich einstellt, wenn eine Schüttschicht aus Feststoffpartikeln von unten mit einem Fluid (Flüssigkeit oder Gas) durchströmt wird [11]. Bei geringen Gasgeschwindigkeiten bleiben die Feststoffpartikel gegenseitig fixiert. Es handelt sich dann um ein Festbettverfahren ohne Partikelbewegung. Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit, an dem Punkt,

in dem die Widerstandskraft der Strömung beginnt das Gewicht der Schicht im Fluid zu tragen, lockert sich die Schüttung. Die Partikel erreichen so eine gewisse Bewegungsfreiheit. Das Verhalten der Schüttung ist nun vergleichbar mit einer Flüssigkeit. Das Festbett wird zum Fließbett, die Schüttung zu einer Wirbelschicht. Der Punkt der minimalen Fluidisierung u_{mf} ist erreicht [7], es wird vom Lockerungspunkt oder Wirbelpunkt gesprochen. Die jetzt ausgedehnte Schüttung weist mit der Lockerungsporosität ε_L eine höhere Porosität als die Festbettporosität ε_0 auf. Bis zum Erreichen des Lockerungspunktes wird eine steigende Druckdifferenz Δp über der Schüttung bei Erhöhung der Durchströmung erreicht. Wird die Durchströmung weiter gesteigert, bleibt die Druckdifferenz Δp konstant.

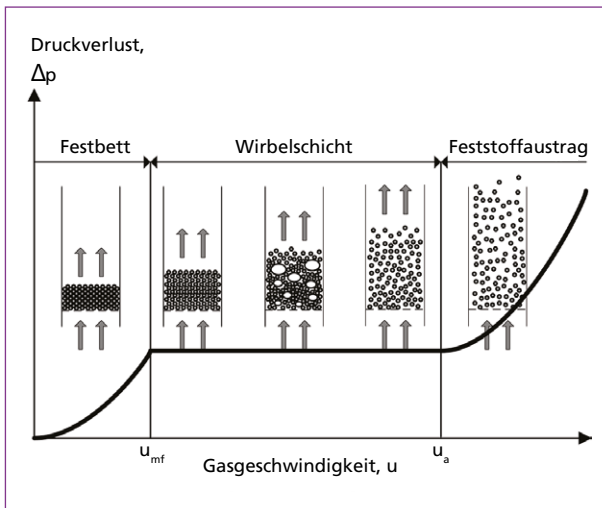


Bild 1:

Schematische Darstellung des Druckverlustdiagramms

Der Verschleiß in bzw. durch Wirbelschichten muss differenziert werden nach Verschleiß des Wirbelmediums selbst und Verschleiß der Wirbelapparatur. Letzterer beschränkt sich auf Konstruktionen mit unzureichender Materialwahl bzw. Einbauten, die im rechten Winkel zum Fluidisationsstrom liegen, sowie Apparate, deren Betriebsbedingungen durch z.B. hohe Temperaturen oder wechselweise oxidierende und reduzierende Atmosphäre besonders materialermüdend sind [6]. Dies kann sich jedoch als eine Art schonendes Sandstrahlverfahren auch zunutze gemacht werden. Senkrechte Wandungen unterliegen einem kaum nachweisbaren Verschleiß, da der Winkel der auftreffenden Partikel i.d.R. sehr flach ist. Bei Verwendung von Katalysatormaterial oder Additiv ist der Verschleiß des Wirbelmediums ein nicht außer Acht zu lassender Betriebskostenfaktor, da durch die Partikelabrasion Verluste zu erwarten sind. Denen gegenüber steht aber eine dadurch maximierte Partikeloberfläche, die für eine Reaktion deutliche Vorteile bietet. Für Geschwindigkeit und Ausmaß sind die Materialeigenschaften wie Härte, Sprödigkeit usw. maßgebend, ferner ihre Gestalt. Untersuchungen von [1] zufolge, stellt sich nach anfänglich hoher Erosion vorzugsweise im Bereich der Ecken und Kanten, dann ein konstanter Verlauf des Teilchenabriebs ein. Hierbei ist durch eine angepasste und zielgerichtete Konstruktion der Verschleiß

zu minimieren, im Idealfall auszuschließen. Demzufolge ändern sich in erster Linie Sphärizität und Durchmesser der Partikel, was Auswirkungen auf das Wirbel- und Wärmeübertragungsverhalten hat.

Somit lassen sich Wirbelschichtanlagen unterteilen in stationäre Anlagen, bei denen es weitestgehend nicht zu einem Austrag von Partikeln kommt, und zirkulierenden Anlagen, bei denen Bettmaterial und größere, noch nicht umgesetzte Brennstoffpartikel ausgetragen und über einen Zyklon in den Reaktor zurückbefördert werden. Eine Ausnahme bilden an dieser Stelle Wirbelschichtreaktoren für die Verbrennung von Klärschlamm. Hierbei wird der hohe anorganische Anteil aufgrund seiner sehr geringen Korngröße mit dem Gasstrom aus dem Bett gerissen und über die Wärmerückgewinnung zu einer Entstaubung verbracht. Dabei ist es wichtig, keine Erweichungstemperatur im Prozess zu erreichen. Durch die Vermischung von Brennstoff und Bettmaterial bilden sich keine definierten Reaktionszonen wie bei den Festbettvergasern aus. Die Umsetzung des Brennstoffs sowie die Weiterreaktion der Zwischenprodukte erfolgt gekoppelt an die Feststoffvermischungsströme über den gesamten Reaktor verteilt. Darüber hinaus ermöglicht die Vermischung den Einsatz von Additiven [3]. Damit kann z.B. erhöhte SO₂-Einbindung, quasi als Vorentschwefelung im Reaktor selbst, einfach erfolgen. Der Brennstoffeintrag in einen Wirbelschichtreaktor wird über verschiedene Wege realisiert. Je nach Einsatzstoff und geforderter Partikelverweilzeit im Reaktorinneren kann die Brennstoffzufuhr über den Reaktordeckel beziehungsweise über seitliche Fördersysteme wie etwa Wurfbeschicker erfolgen. Die Fluidisierung führt zu einer guten Vermischung des Bettmaterials je nach Geldart-Klasse sowie einer Vermischung von Bettmaterial und Brennstoff, bevor es aufgrund von Dichteunterschieden zur Entmischung kommt.

1.1. Thermo-chemische Umsetzung in Wirbelschichtreaktoren

Das Ziel einer thermo-chemischen Konversion ist es, die in einem Brennstoff enthaltene Energie unter Zuführung von Wärme nutzbar zu machen. Dabei kann grundsätzlich zwischen den vier Verfahren Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung sowie Verkohlung unterschieden werden.

Die Konversionsverfahren werden häufig durch die Luftzahl λ definiert, welche das Verhältnis von zugeführter zu stöchiometrisch – also für die vollständige Verbrennung benötigter – Luftmenge darstellt [9]. Die wesentlichen Unterschiede der Verfahren sind in der Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Charakterisierung thermo-chemischer Umsetzungsprozesse [6]

Konversionsverfahren	Luftzahl (λ)	Prozesstemperatur	Hauptprodukte
Verbrennung	$\lambda > 1$	800 – 1.300 °C	CO ₂ , H ₂ O
Vergasung	$0 < \lambda < 1$	650 – 1.500 °C	CO, H ₂
Pyrolyse	$\lambda = 0$	200 – 500 °C	C _x H _y , C _{fix}
autotherme Pyrolyse	$\lambda > 0$	T < 700 °C	C _x H _y , C _{fix} , CO ₂ , H ₂ O
autotherme Vergasung	$0,3 < \lambda < 0,5$	T > 800 °C	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O

Bei der Verbrennung von Klärschlämmen in Wirbelschichtreaktoren werden naturgemäß die gesamten Teilschritte durchlaufen. Dies beginnt mit der Verdampfung der Restfeuchtigkeit, also einer Trocknung, und führt, je nach Bereich des Reaktors, von der Pyrolyse über die Vergasung bis zur vollständigen Verbrennung.

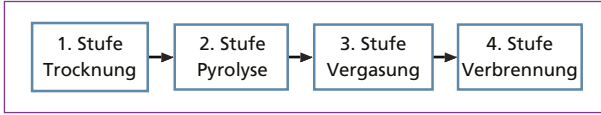


Bild 2:

Die Verfahrensstufen bei der Verbrennung [2]

1.2. Stickoxide im Verbrennungsprozess

Um den Ansatz zur Minimierung von Stickoxiden bzw. den Ansatz NO_x zu reduzieren zu verstehen, bedarf vorab einer kurzen grundlegenden Bestimmung der Bildungsmechanismen sowie der dazu gehörigen Abbaumechanismen. Der Begriff NO_x ist als Sammelbezeichnung der unterschiedlichen Oxide des Stickstoffes zu verstehen, wie etwa N_2O (Distickstoffmonoxid, auch als Lachgas bekannt), NO (Stickstoffmonoxid) etc. Gemeinhin wird in erster Linie das Stickstoffmonoxid gebildet, erst nach der eigentlichen Verbrennung und weiterer Anwesenheit von freiem Sauerstoff, etwa in der Atmosphäre, bildet sich Stickstoffdioxid.

Für die Bildung von Stickoxiden im Abgas sind in erster Linie die Temperatur der Verbrennung sowie der im Brennstoff gebundene Stickstoff selbst maßgebend. Die Entstehung von Prompten Stickoxiden wird hier nicht weiterverfolgt, da diese im Bereich der Mono-Klärschlammverbrennung auf Wirbelschichtbasis eine untergeordnete Rolle spielt. Dies ist in Bild 3 zu erkennen.

Klärschlammverbrennung

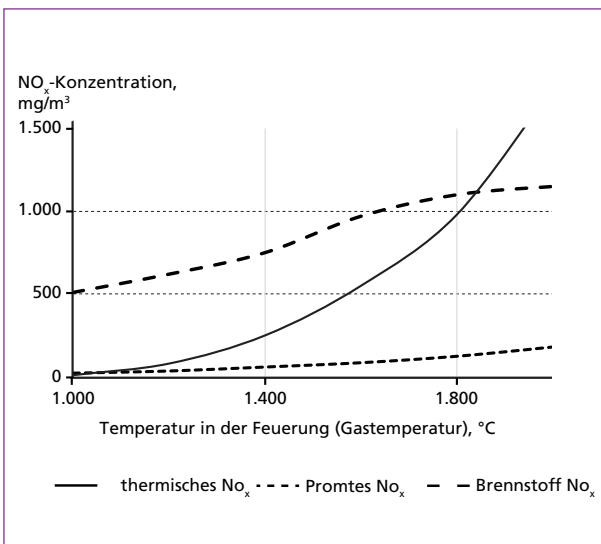


Bild 3:

Die NO_x -Bildung in Abhängigkeit der Gastemperaturen, Bildungsmechanismen [in Anlehnung an 10]

Für die thermische Stickoxid-Bildung ist die jeweilige Konzentration an Sauerstoffatomen, die während der Verbrennung verfügbar ist, maßgeblich verantwortlich. Die Sauerstoffkonzentration wächst infolge der Dissoziation von Sauerstoff oberhalb von rund 1.200 °C mit steigender Temperatur stark an. Infolgedessen steigt auch die Stickoxid-Bildungsgeschwindigkeit. Die Entstehung von thermischen Stickoxiden ist bei der Wirbelschichtverbrennung von Klärschlamm nicht der Haupttreiber. Dieser ist in der Umsetzung des im Brennstoff vorhandenen Stickstoffes zu finden. Der Einsatzstoff kann chemisch gebundenen Stickstoff in organischer Form (etwa Amide oder Amine) oder anorganische Stickstoffverbindungen wie NH_3 enthalten. Die Freisetzung des Einsatzstoffes Stickstoff erfolgt dabei homogen oder heterogen. Unter homogener Stickoxidbildung ist dabei nicht der Einsatzstoff Stickstoff entscheidend, sondern die Oxidation der Ammoniakradikale, die entweder aus den ursprünglichen Stickstoffverbindungen, oder über die Komponenten HCN entstehen [4]. Diese Reaktionen laufen sehr langsam ab. Auch hat sich gezeigt, dass mit einer abnehmenden Luftzahl ($\lambda < 1$) ein Zurückgehen der Stickstoffmonoxid Konzentration einhergeht, da nicht genügend Sauerstoff für eine weitere Oxidation des Stickstoffes zur Verfügung steht. Allerdings steigt ab einem λ von etwa 0,8 die Produktion von Zwischenprodukten der Brennstoff-Stickstoffmonoxid-Verbindungen, die zuvor ein Minimum einnahm [5]. In Hinblick auf die Minimierung von Distickstoffmonoxidemissionen ist dieser Bereich anzustreben, da unter anderem festgestellt wurde, dass Distickstoffmonoxid nahezu ausschließlich auf die Oxidation von HCN zurückzuführen ist, während Stickstoffmonoxid neben HCN auch die Anwesenheit von NH_3 benötigt [8, 12].

Die heterogenen Bildungsmechanismen schließen sich an die homogenen Gasphasenreaktionen an. Diese resultieren aus dem weiteren Ausbrand der Feststoffpartikel und parallelen Gasphasenreaktionen. Diese Reaktionen sind weitaus komplexer, da nicht nur die Bildungen zu beobachten sind, sondern auch Reduktionsreaktionen. Im Allgemeinen lässt sich hier das Fazit ziehen, dass eine niedrige Sauerstoffkonzentration über den gesamten Gasweg die Stickstoffmonoxidbildung positiv verringert. Dies geschieht etwa durch eine gestufte Luftzugabe.

2. Konzept Wirbelschichtfeuerung

Entsprechend der Mechanismen, die im vorgestellten Kapitel angeführt wurden, basiert das Reaktordesign auf der Adaption verschiedener Primärmaßnahmen. Dabei sind insbesondere folgende Punkte zu nennen:

- Absenkung des Sauerstoffangebotes und Einstellung je Reaktionszone,
- Anstreben einer möglichst geringen Verbrennungstemperatur,
- Definierte Zonen, möglichst *langgezogene* Verbrennung zur Vermeidung von Spitzentemperaturen durch gute Vermischung,
- Reduktion der bereits im Wirbelbett/in der primäre Reaktionszone gebildeten Stickstoffoxide am Flammenende der zweiten Reaktionszone und
- Abgasrezirkulation.

In Bild 4 ist eine schematische Darstellung des Reaktordesigns angeführt. Hierbei sind folgende Zonen zu unterscheiden:

- die sogenannte Windbox unterhalb des Düsenbodens (an die ein Anfahrbrüner angeflanscht ist, um bei Start der Anlage die Prozesstemperatur sicher zu stellen),
- die Wirbelschicht als unterer Teil des Reaktors, oberhalb des Düsenbodens mit konischer Erweiterung zu einem Reaktionsraum,
- Einengung und Übergangskanal mit selektiver Zugabe von Sekundärluft und
- Nachreaktionszone als aufgesetzte Nachbrennkammer.

Dieses Layout bietet unter anderem die Möglichkeit, den Einsatzstoff an unterschiedlichen Stellen der Anlage zuzuführen. So ist es möglich, klassisch mittels Wurfbeschicker oberhalb des Konus den Einsatzstoff einzubringen, es besteht aber auch die Option ohne spezielle Beschickungseinrichtung über den Kopf der Wirbelschicht den Brennstoff zuzugeben. Diese Möglichkeit ist in Mainz gewählt worden und minimiert den Einsatz mechanischer Komponenten.

Die Primärluft wird zusammengesetzt aus angesaugter Frischluft und zugemischter Rezirkulationsluft. Dies erfolgt zum einen aufgrund der Anforderung auf die Luftzahl Einfluss nehmen zu können, zum anderen aber auch aufgrund der geforderten hohen

Lastspreizung der Anlage. Dadurch wird im Normalbetrieb eine lastunabhängige Temperaturkontrolle im Bett ermöglicht. Im Bereich der Wirbelschicht wird eine partielle Oxidation angestrebt. Die über den Übergangskanal geleiteten Abgase (Prozessgase) werden hier mit Sekundärluft (Frischluft) beaufschlagt. Die Sekundärluftzuführung erfolgt über eine Vielzahl von Düsen, um eine möglichst gleichmäßige lastabhängige Einmischung zu erreichen. Der durch die Einschnürung bedingte Druckverlust wird in Kauf genommen, da hierdurch die Vermischung des aufsteigenden Gasstromes erheblich verbessert wird. Zusätzlich wird in dem Übergangskanal der Anteil an nicht kondensierbaren Brüden aus der Brüdenkondensation zugeführt.

Die aufgesetzte Nachbrennkammer reduziert die Gasgeschwindigkeit und es wird der vollständige Ausbrand sichergestellt. Anschließend erfolgt die Überführung des Abgases in den Kessel.



Bild 4: Wirbelschichtofen Design Küttner GmbH & Co KG mit Nachbrennkammer

In bereits realisierten Anlagen dieser Bauart und Einzelkomponenten konnten sehr gute Ausbrandgüten bei gleichzeitig geringen Stickoxidwerten erreicht werden als Resultat der speziellen Geometrie des Designs. Der Wirbelschichtverbrennungsreaktor in Mainz besitzt keine sekundären Entstickungseinrichtungen. Mit Hinblick auf Verschärfung von Abgasgrenzwerten und der Option eine SNCR möglichst einfach nachrüsten zu können, sind bereits Stutzen an optimalen Stellen für das einfache Nachrüsten vorhanden.

3. Literatur

- [1] Beránek, J.; Rose, K.; Winterstein, G.: Grundlagen der Wirbelschichttechnik. Mainz: Krausskopf-Verlag GmbH, 1975, S. 43, S. 168, S. 199/200
- [2] Gummersbach, J.: Experimentelle Untersuchung der Pyrolyse in einem Drehrohr als Bestandteil einer Vergasungsanlage mit Restkoksverbrennung. Dissertation, Universität Siegen, 2005
- [3] Hamel, S.; Krumm, W.: Fortgeschrittene zweistufige Biomassevergasungsverfahren. In: VDI-GET-Tagung *Entwicklungslinien der Energietechnik*. Tagung Bochum, 4. und 5. September 2002. Düsseldorf. VDI-Verlag. (VDI-Berichte, 1714), 2002
- [4] Jansohn, P.; Kolb, T.; Leukel, W.: Bildung von Stickstoffoxiden aus Brennstoff-Stickstoff in turbulenten Diffusionsflammen und deren Reduktion durch feuerungstechnische Maßnahmen. Jahrestreffen der Verfahreningenieure, Hannover, 1988
- [5] Kremer, H.: Grundlagen der NO_x -Entstehung und -minderung; Gaswärme International 35, 1986, S. 239-246
- [6] Krishnan, R. P.; Daw, C. S.; Jones, J. E.: A review of fluidized bed combustion technology in the United States. in: Swaaij van, W.P.M., Afgan, N.H. (Eds.): Heat and mass transfer in fixed and fluidized beds, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 433-455, 1986
- [7] Lin, C.-L.; Wey, M.-Y.; You, S.-D.: The effect of particle size distribution on minimum fluidization velocity at high temperature. Powder Technology, Vol. 126, Nr. 3, pp. 297-301, 2002
- [8] Löffler, G.; Andahazy, A.; Wartha, C.; Winter, F.; Hofbauer, H.: Simulation des Abbrands eines Kohlepartikels in einer stationären Laborwirbelschicht – Untersuchung der Mechanismen zur Bildung von NO_x und N_2O ; VDI-Berichte Nr. 1629, 2001, S. 585-590
- [9] Rumpel, S.: Die autotherme Wirbelschichtpyrolyse zur Erzeugung heizwertreicher Stützbrennstoffe. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2000
- [10] Schrod, M.; Semel, J.; Steiner, R.: Verfahren zur Minderung von NO_x -Emissionen in Rauchgasen; Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) Nr. 9, S. 717-727
- [11] Stuess, M.: Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1: Beschreibung und Erzeugung von dispersen Stoffen. 3. Auflage; Springer Verlag Berlin Heidelberg; ISBN 978-3540325512; 2007
- [12] Wargadalam, V. J.; Löffler, G.; Winter, F.; Hofbauer, H.: Homogeneous Formation of NO and N_2O from Oxidation of HCN and NH_3 at 600–1000 °C; Combustion and Flame 120, 2000, S. 465-478

Ansprechpartner



Dr.-Ing. Matthias Mann
Küttner Martin Technology GmbH
Leiter Technologie
Verfahrenstechnik
Leopoldstraße 246
80807 München, Deutschland
+49 175 5880660
m.mann@kuettner.com

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Peter Quicker, Stefan Kopp-Assenmacher (Hrsg.):

Verwertung von Klärschlamm

ISBN 978-3-944310-43-5 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Olaf Holm
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Janin Burbott-Seidel, Ginette Teske, Roland Richter, Sarah Pietsch,
Cordula Müller, Gabi Spiegel
Druck: Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.