

# ANWENDUNG DER AKTIVEN ISOLIERUNG ZUR KLIMATISIERUNG VON FAHRZEUGEN AM BEISPIEL VON KABINEN MOBILER LANDMASCHINEN

I. EBINGER

Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden  
Sektion Fahrzeugtechnik  
Vorgelegt von Prof. Dr. E. Pásztor

Eingegangen: April 5. 1990.

## Abstract

In small spaces loaded heavily thermally, e. g. in the cabins of the mobile agricultural machines, it is difficult to develop favourable climatic conditions (temperature, humidity degree, air velocity, etc.) required for accommodating the operating personnel with the help of natural ventilation, especially in the case of a heavy load of solar radiation. In case of the latter solution, the volume flow-rate required for natural ventilation will be too strong and accordingly, air velocities harmful for health will develop in the cabin.

In this case, the so called 'active heat insulation' (air flow between two walls) provides favourable solution. Under the condition of active heat insulation, the volume-flow rate of the required fresh air flowing into the cabin will be considerably reduced, and this, in turn, involves the reduction of the local air velocities in the cabin and the improvement in the personnel's general health condition staying in the cabin.

In the paper, the calculation procedure of the active heat insulation is discussed, and a numerical example is also given. The traditional and active heat insulations are compared to each other, and the advantages of the active heat insulation are analyzed.

With the application of active heat insulation, favourable results were achieved not only in the air conditioning of the cabins of agricultural machines but with railway wagons, too.

*Keywords:* natural ventilation, active heat insulation, permissible speed, favourable climatic conditions.

## Einleitung

Moderne selbstfahrende Landmaschinen werden im allgemeinen mit geschlossenen Kabinen ausgerüstet, die das Bedienpersonal vor Witterungseinflüssen, Lärm sowie Staub- und Geruchsbelästigungen schützen sollen. Die Kabinen sind zum großen Teil verglast, um die zur Feldarbeit erforderlichen Sichtverhältnisse zu gewährleisten.

Während bei der Bedienung derartiger Maschinen der Anteil körperlicher Arbeit immer mehr abnimmt, steigt der Umfang zu verarbeitender Informationen (z.B. durch Bordcomputer) stark an. Um die maxi-

male Auslastung der Maschinen vor allem bei stark saisonabhängigen Arbeiten (Getreideernte) zu sichern, müssen Bedingungen geschaffen werden, die die Attraktivität für das Bedienpersonal erhöhen und einer Leistungsminderung vorbeugen. Dazu ist neben der zweckmäßigen Gestaltung des Sitzes und einer günstigen Anordnung der Bedien- und Kontrolleinrichtungen die Realisierung eines optimalen Mikroklimas (entsprechend TGL 32 603: Mikroklima in Arbeitsräumen) in der Kabine anzustreben.

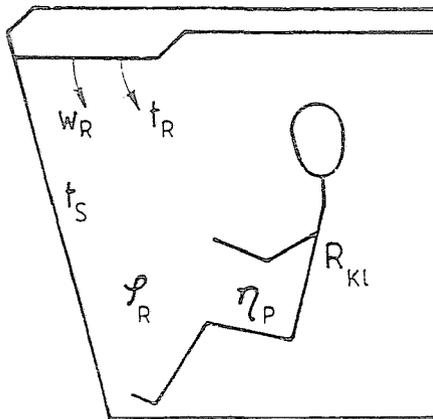
Optimale mikroklimatische Bedingungen gewährleisten für das Bedienpersonal die thermische Behaglichkeit und bieten somit die besten Leistungsvoraussetzungen.

### Notwendigkeit der Klimatisierung von Kabinen

Die auf die thermische Behaglichkeit des Bedienpersonals einflußnehmenden Parameter sind in *Abb. 1* dargestellt. Im einzelnen handelt es sich um:

- |   |               |
|---|---------------|
| – die Raumlufttemperatur                          | $t_R$ ,       |
| – die Strahlungstemperatur der Umschließungswände | $t_S$ ,       |
| – die örtliche Luftgeschwindigkeit in der Kabine  | $w_R$ ,       |
| – die relative Raumluftfeuchtigkeit               | $\varphi_R$ , |
| – den Aktivitätspegel des Bedienpersonals         | $\eta_P$ und  |
| – den Wärmeleitwiderstand der Bekleidung          | $R_{Kl}$ ,    |

wobei die ersten vier Parameter als thermische Raumklimakomponenten bezeichnet werden. Alle genannten Parameter beeinflussen einander, so daß nur eine komplexe Betrachtung zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.



*Abb. 1.* Die thermische Behaglichkeit der Bedienperson beeinflussenden Parameter

Die nachfolgenden Untersuchungen sollen sich zunächst auf die Bewertung der Raumklimakomponenten Raumlufttemperatur  $t_R$ , Strahlungstemperatur der Umschließungswände  $t_s$  und Raumluftgeschwindigkeit  $w_R$  beschränken. Die relative Raumluftfeuchtigkeit  $\varphi_R$  kann in einem sehr großen Bereich schwanken ( $\varphi_R = (30 \dots 70)\%$ ), so daß in der gemäßigten Klimazone ihr Einfluß auf die thermische Behaglichkeit auch in kleinen Räumen gering ist. Aus diesem Grund soll sie vernachlässigt werden.

Das Kabinenklima wird durch die infolge innerer und äußerer Raumklimastörgrößen auftretende Wärmelast bestimmt. *Abb. 2* zeigt die auf die Kabine einwirkenden Störgrößen. Von außen wirken auf die einzelnen Flächen  $j$  der Kabine:

- der Transmissionswärmestrom  $\dot{Q}_{T,j}$ ,
- der Wärmestrom infolge Strahlung  $\dot{Q}_{S,j}$ ,
- Wärmeströme durch in der Nähe der Kabine befindliche Wärmequellen (z.B. Motor)  $\dot{Q}_{MG,j}$  und
- die Enthalpiestromdifferenz durch ungewollten Luftwechsel aufgrund vorhandener Undichtheiten  $\Delta \dot{H}_{uL}$ .

Als innere Raumklimastörgröße soll im vorliegenden Fall nur die Wärmeabgabe durch das Bedienpersonal  $\dot{Q}_P$  betrachtet werden.

Somit ergibt sich für die Bestimmung der Wärmelast die Beziehung:

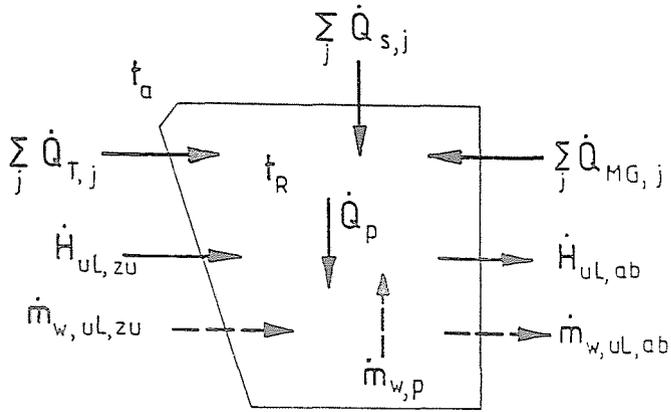
$$\dot{Q}_{Lc} = \sum \dot{Q}_{S,j} + \sum \dot{Q}_{T,j} + \sum \dot{Q}_{MG,j} + \Delta \dot{H}_{uL} + \dot{Q}_P. \quad (1)$$

Auf die Feuchtebilanz wird aufgrund der erwähnten Tatsache, daß die relative Raumluftfeuchtigkeit  $\varphi_R$  eine untergeordnete Rolle spielt und die Feuchtigkeitsabgabe des Bedienpersonals im vorliegenden Fall sehr gering ist, vorerst nicht explizit eingegangen. (*Gl. 2a.*)

Alle die Verschmutzung der Luft (Staub) betreffenden Fragen sollen bei den weiteren Betrachtungen ausgeklammert werden. Mit dieser Frage wird man sich an anderer Stelle gesondert auseinandersetzen.

Betrachtet man die Bedingungen für den Einsatz selbstfahrender Landmaschinen im Sommer näher, so überwiegt in dieser Jahreszeit der Einfluß der Strahlungslast  $\sum \dot{Q}_{S,j}$  gegenüber der Transmissionswärmelast  $\sum \dot{Q}_{T,j}$ . Die direkte Sonneneinstrahlung durch die großen Fensterflächen führt zu einer starken Erwärmung in der Kabine ('Treibhauseffekt'), so daß die Raumlufttemperatur  $t_R$  die Außenlufttemperatur  $t_a$  übersteigt. Vereinfacht läßt sich die in einer unbelüfteten Kabine zu erwartende Raumlufttemperatur  $t_R$  mit *Gl. (2)* bestimmen

$$t_R = t_a + \frac{\sum \dot{Q}_{S,j} + \sum \dot{Q}_{MG,j} + Q_P}{k \cdot A + \dot{V}_{L,uL} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L}}. \quad (2)$$



$$\dot{Q}_{La} = \sum_j \dot{Q}_{s,j} + \sum_j \dot{Q}_{T,j} + \sum_j \dot{Q}_{MG,j} + \Delta \dot{H}_{uL} - \dot{Q}_p \quad (1)$$

$$\dot{m}_{w,La} = \dot{m}_{L,uL} (x_a - x_R) + \dot{m}_{w,p} \quad (2)$$

Abb. 2. Raumklimastörgrößen; Wärme- und Feuchtigkeitslast

In unbelüfteten Kabinen stellt sich eine Raumlufttemperatur  $t_R$  ein, die je nach Tageszeit und auftretender Strahlungsintensität zwischen 5 K und mehr als 15 K über der Außenlufttemperatur  $t_a$  liegt. Diese Werte wurden auch durch Messungen mehrfach bestätigt.

Zum Erreichen eines behaglichen Kabinenklimas muß die auftretende Wärmelast kompensiert werden. Das ist durch freie Lüftung (Fensterlüftung), die aber alle Vorteile einer Kabine ad absurdum führt oder durch einen in die Kabine einzublasenden Luftmassestrom  $\dot{m}_{L,zu}$  möglich. Es kann sich dabei direkt um Außenluft mit  $t_{zu} = t_a$  (Druckbelüftung) oder einen in einer Klimaanlage aufbereiteten Luftmassestrom mit  $t_{zu} < t_a$  handeln.

### Klimatisierung mit herkömmlicher Luftführung

Unter dem Begriff der herkömmlichen Luftführung soll verstanden werden, daß der gesamte zur Wärmelastkompensation benötigte Luftmassestrom

direkt in den Wirkungsbereich des Bedienpersonals (in die Kabine) eingeblasen wird.

Mit Gl. (3) wurden bei verschiedenen Zulufttemperaturen  $t_{zu}$  und unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen  $\dot{V}_{L,zu}$  die zu erwartenden Raumlufttemperaturen  $t_R$  im Auslegungsfall (definiert in der TGL 20 120/04: Prüfvorschriften für landwirtschaftliche Maschinen und Geräte) berechnet.

$$t_R = \frac{1}{1 + \frac{a}{1+b}} \cdot \left( t_a + \frac{a}{1+b} \cdot t_{zu} \cdot \frac{\sum \dot{Q}_{S,j} + \sum \dot{Q}_{MG,j} + \dot{Q}_P}{k \cdot A \cdot (1+b)} \right), \quad (3)$$

$$a = \frac{\dot{m}_{L,zu}}{k \cdot A}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\dot{m}_{L,ul}}{k \cdot a}. \quad (5)$$

Wie in Abb. 3 zu sehen ist, sind in der unbelüfteten Kabine ( $\dot{V}_{L,zu} = 0$ ) Temperaturerhöhungen

$$\Delta t = t_R - t_a \quad (6)$$

gegenüber einer Außenlufttemperatur von  $t_a = 30^\circ\text{C}$  bis 40 K möglich.

Bei Anwendung einer Druckbelüftung ( $t_{zu} = t_a$ ) kann bestenfalls eine Temperaturdifferenz von  $\Delta t = 5\text{ K}$  realisiert werden. Die sich einstellende Raumlufttemperatur ( $t_R$  liegt also 5 K über der Außenlufttemperatur  $t_a$ ) wird in TGL 32 603 mit einer Überschreitungshäufigkeit von 350 Stunden pro Jahr als zulässiges Mikroklima akzeptiert. Zur Realisierung dieser gerade noch zulässigen Raumlufttemperatur müßte bereits ein Zuluftvolumenstrom von  $\dot{V}_{L,zu} = 600\text{ m}^3/\text{h}$  in die Kabine eingeblasen werden.

Daraus folgt ein auf das Kabinenvolumen ( $V_R = 2\text{ m}^3$ ) bezogener Zuluftwechselkoeffizient von

$$\lambda_{zu} = \frac{\dot{V}_{L,zu}}{V_R} = 300\text{ l/h}. \quad (7)$$

Selbst bei einer Zulufttemperatur von  $t_{zu} = 20^\circ\text{C}$  (d.h. bei Einsatz einer Klimaanlage) ist bei einer Außenlufttemperatur von  $t_a = 30^\circ\text{C}$  zur Aufrechterhaltung zulässiger mikroklimatischer Bedingungen (vgl. TGL 32 603;  $t_R = 28^\circ\text{C}$ ) ein Zuluftvolumenstrom von  $\dot{V}_{L,zu} = 650\text{ m}^3/\text{h}$  notwendig.

Aufgrund der großen Zuluftvolumenströme entstehen in der Kabine Luftgeschwindigkeiten, die Zugerscheinungen im Arbeitsbereich des Bedienpersonals zur Folge haben. Die Forderungen nach Behaglichkeit lassen sich in einer Kabine unter den vorliegenden Bedingungen mit einem herkömmlichen Luftführungssystem auch bei Verwendung einer Klimaanlage nicht verwirklichen.

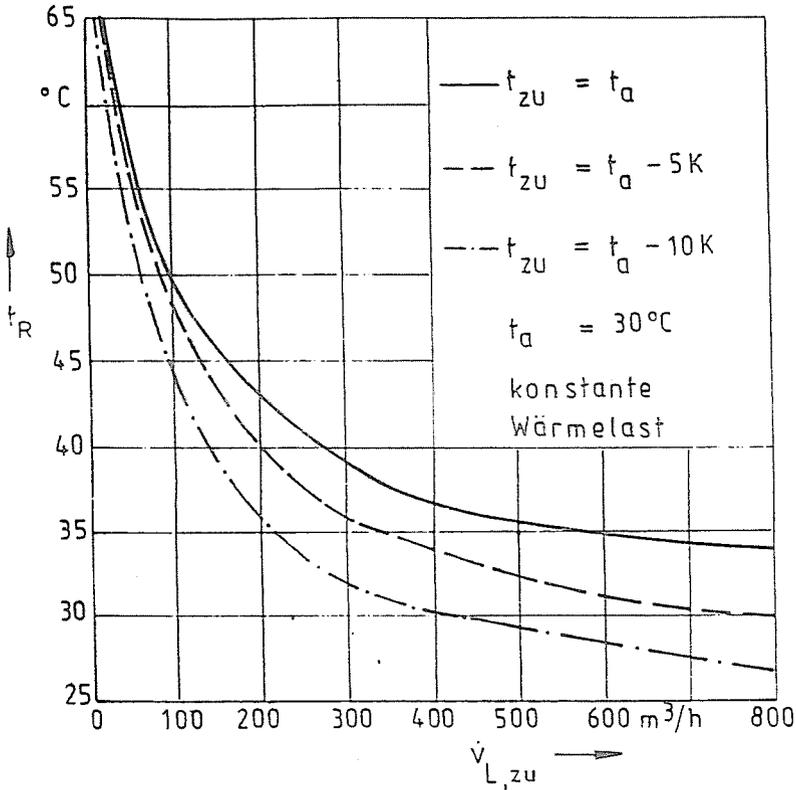


Abb. 3. Raumlufttemperatur in Abhängigkeit von Zuluftvolumenstrom und Zulufttemperatur

### Klimatisierung von Kabinen mit aktiver Isolierung

Ziel ist es, die Luftführung so zu gestalten, daß die Wärmelastkompensation weitestgehend außerhalb des Wirkungsbereiches des Bedienpersonals erfolgt und nur der hygienisch notwendige Luftmassenstrom in die Kabine eingeblasen wird. Eine Lösungsvariante stellt die Anwendung einer sogenannten 'aktiven Isolierung' dar. Dazu werden einige oder alle Umschließungsflächen der Kabine (einschließlich der verglasten Flächen) doppelwandig ausgeführt.

Als Beispiel soll eine mögliche Variante zur Vollummantelung der Kabine betrachtet werden (Abb. 4). Ein in dem durch die Doppelwände entstehenden Mantel im Umluftregime zirkulierender Luftmassenstrom  $\dot{m}_{L,M}$  kompensiert einen Teil der auftretenden Wärmelast. Dabei erwärmt er sich und wird vor dem nächsten Umlauf mit Hilfe einer Klimaanlage auf eine vorgegebene Eintrittstemperatur in den Mantel  $t_{ME}$  abgekühlt. In die

Kabine wird nur noch der zum Erreichen der geforderten Raumlufttemperatur  $t_R$  notwendige Luftmassenstrom  $\dot{m}_{L,zu}$  eingeblasen, der ebenfalls in einer Klimaanlage aufbereitet wurde.

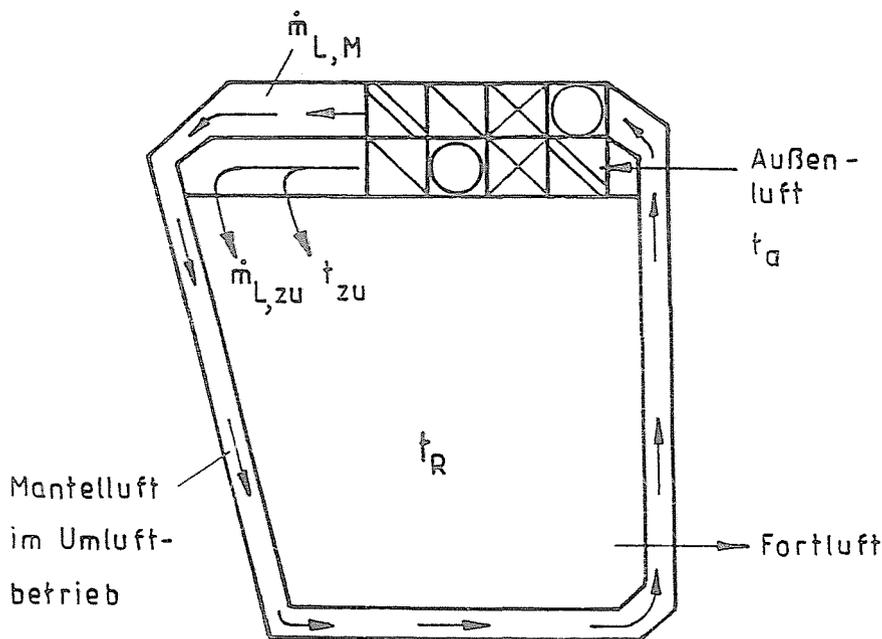


Abb. 4. Aktive Isolierung für Kabinen. Prinzipdarstellung

Zur Berechnung der Wärmelast in der Kabine wurde von dem in Abb. 5 dargestellten Modell ausgegangen. Nachdem die verschiedenen Wände der Kabine entsprechend ihrer Geometrie und ihrem Aufbau in einzelne Flächenelemente  $dA$  untergliedert worden waren, konnten schrittweise mit Hilfe eines Rechenprogramms die Temperaturänderungen der im Mantel zirkulierenden Umluft und der Raumluft in der Kabine berechnet werden. Abb. 6 zeigt eine Gegenüberstellung wichtiger Parameter bei Klimatisierung der Kabine mit herkömmlicher Luftführung und bei Einsatz der aktiven Isolierung.

Im Vergleich zur herkömmlichen Klimatisierung wird mit Hilfe der aktiven Isolierung bei gleichen Bedingungen hinsichtlich der Raumklimastörgrößen und der angestrebten Raumlufttemperatur ca. 46% der Wärmelast



Beispiel:  $\sum_j \dot{Q}_{Sj} = 1255 \text{ W}$        $\sum \dot{Q}_{MG,j} = 0$   
 $\dot{Q}_P = 170 \text{ W}$        $\lambda_{L,uL} = 1 \text{ h}^{-1}$   
 $w_{ME} = 1,5 \text{ m/s}$

zulässige mikroklimatische Bedingungen

		herkömmliche Klimatisierung	aktive Isolierung
$t_a$	°C	30	30
$t_R$	°C	28	28
$t_{LME}$	°C	—	20
$\dot{V}_{LM}$	m <sup>3</sup> /h	—	400
$\dot{Q}_{La,R}$	W	1468	795
$t_{zu}$	°C	20	20
$\dot{V}_{L,zu}$	m <sup>3</sup> /h	650	280
$\dot{Q}_{o,zu}$	W	2177	938
$\dot{Q}'_M$	W	—	594
$\dot{Q}_{o,ges}$	W	2177	1532

Abb. 6. Vergleich von Berechnungsergebnissen bei herkömmlicher und aktiver Isolierung

Verknüpfung der Temperaturen  $t_R$  und  $t_S$  wird in Gl. (8) deutlich:

$$t_E = a_1 \cdot t_R + a_2 \cdot t_S. \quad (8)$$

Die Koeffizienten  $a_1$  und  $a_2$  sind dabei u.a. von der Raumluftgeschwindigkeit  $w_R$  abhängig.

Bei der herkömmlichen Klimatisierung werden die Wandtemperaturen der Umschließungsflächen aufgrund ihres geringen Wärmespeichervermögens stark von der Außenlufttemperatur und der auftreffenden Strahlungsbelastung beeinflusst. Sie liegen in einer herkömmlich klimatisierten Kabine oft über der Raumlufttemperatur. Mit Hilfe der aktiven Isolierung kann man bei einer Lufttemperatur am Manteleintritt von  $t_{ME} = 20^\circ\text{C}$  eine mittlere Wandtemperatur in einem Bereich von  $t_{w,m} = 26^\circ\text{C}$  erreichen. Die Wand wird bei einer realisierten Raumlufttemperatur von  $t_R = 28^\circ\text{C}$  zum 'kalten Strahler' und beeinflusst die Empfindungstemperatur  $t_E$  dadurch positiv.

## Zusammenfassung

In stark verglasten kleinen Räumen, z.B. Kabinen mobiler Landmaschinen, ist bei großen Strahlungslasten die Schaffung thermisch behaglicher Raumluftzustände für die Bedienpersonen mit einem herkömmlichen Luftführungssystem nicht möglich. Die notwendige Wärmelastkompensation zur Schaffung einer vorgegebenen Raumlufttemperatur kann nur mit großen Zuluftvolumenströmen, die hohe örtliche Luftgeschwindigkeiten und somit Zegerscheinungen hervorrufen und niedrigen Zulufttemperaturen erreicht werden. Die Temperaturen der Umschließungswände nehmen infolge hoher Strahlungslasten und geringer Wärmedämmung Werte oberhalb der Raumlufttemperatur an und beeinflussen dadurch die Empfindungstemperatur negativ.

Der Einsatz einer aktiven Isolierung eröffnet Möglichkeiten zur Lösung des Problems. Durch den teilweisen Abbau der Wärmelasten außerhalb des Wirkungsbereiches der Bedienperson kann der Zuluftvolumenstrom in die Kabine verringert werden, was eine Reduzierung der örtlichen Luftgeschwindigkeiten und damit möglicher Zegerscheinungen zur Folge hat. Die Temperaturen der Umschließungsflächen werden herabgesetzt. Die nun als kalte Strahler anzusehenden Flächen tragen zur Verbesserung der Klimaverhältnisse in der Kabine bei.

Das Verfahren der aktiven Isolierung läßt sich natürlich im Heizbetrieb analog anwenden. Im Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen zur Klimatisierung von Reisezugwagen mit aktiver Isolierung bei extrem niedrigen Außenlufttemperaturen konnten bereits aufschlußreiche Erkenntnisse gewonnen werden.

Das Klimatisierungssystem der aktiven Isolierung ist im Vergleich zu bisherigen Lösungen mit erhöhten Aufwendungen bei seiner Installation verbunden. Aus diesem Grund muß genau geprüft werden, für welche Anwendungsfälle sich der Einsatz wirklich lohnt.

Die Anwendung herkömmlicher passiver Mittel zur Verringerung der Wärmelasten in einer Kabine (z.B. Verschattungseinrichtungen, wärmeabsorbierende Verglasungen, Optimierung der Wärmeisolierung) muß stets an erster Stelle einzuleitender Maßnahmen stehen und in Kombination mit dem gewählten Klimatisierungssystem bewertet werden.

*Address:*

Dr. Ing. Ingwer EBINGER  
Seehofstraße 106  
D-W-1000 Berlin 37  
Germany