

# Energie-Bedarfsanalyse bei Klimaanlage von Schienenfahrzeugen

G. Haller, M. Kreitmayer, M. Kremen

## 1. Einleitung

Das Komfortangebot in Schienenfahrzeugen zu verbessern, ist eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs. Vor allem die Fahrzeugklimatisierung kann hier einen im wahrsten Sinn des Wortes „fühlbaren“ Beitrag leisten.

Für dieses Mehr an thermischer Behaglichkeit für die Fahrgäste wird aber nicht unerheblich mehr Energie benötigt, die zum Beispiel bei einem Reisezugwagen bis zu 100 MWh/Jahr betragen kann. Bewährte Klimakonzepte bieten heute meist

eine sehr gute thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen, eine Energieverbrauchsoptimierung ist dabei aber bisher nicht im Vordergrund gestanden.

Mit steigendem ökologischem und ökonomischem Druck gewinnt das Erschließen von Energieeinsparpotentialen, wie sie unter anderem bei der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen gegeben sind, zunehmend an Bedeutung.

Um den Energiebedarf an elektrischer Energie der Klimaanlage in Schienenfahrzeugen analysieren zu können, sind möglichst genaue Leistungsdaten bei ver-

schiedenen Umgebungs- und Betriebszuständen erforderlich.

Bei Messungen auf der Strecke kann zwar der Gesamtenergiebedarf über den gewählten Untersuchungszeitraum und unter den dabei herrschenden Umgebungsbedingungen erfasst werden; auch können bei Paralleluntersuchungen beispielsweise zwei Wagen mit unterschiedlichen Klimaanlage im gleichen Zugverband direkt miteinander verglichen werden. Eine genaue und vor allem reproduzierbare, systematische Ermittlung der Leistungsaufnahme bei verschiedenen

Umgebungs- und Betriebszuständen ist aber aufgrund der sich ständig ändernden Bedingungen nur schwer möglich.

In einem Klima-Wind-Kanal (Abb. 1) dagegen können die verschiedenen Umgebungs- und Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel in Form einer Besetzungssimulation, beliebig eingestellt und die Leistungsdaten bei konstanten Bedingungen ermittelt werden.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden aufbauend auf der bisher angewandten Messpraxis und Erfahrung (Haller, Kreitmayer, 2007) das entwickelte Verfahren zur Messung des Energiebedarfs der Klimaanlage unter definierten Umgebungsbedingungen an einem Reisezugwagen der Type Bmpz im September 2008 validiert und ein erweitertes Berechnungsprogramm zur Energiebedarfsanalyse neu erstellt.

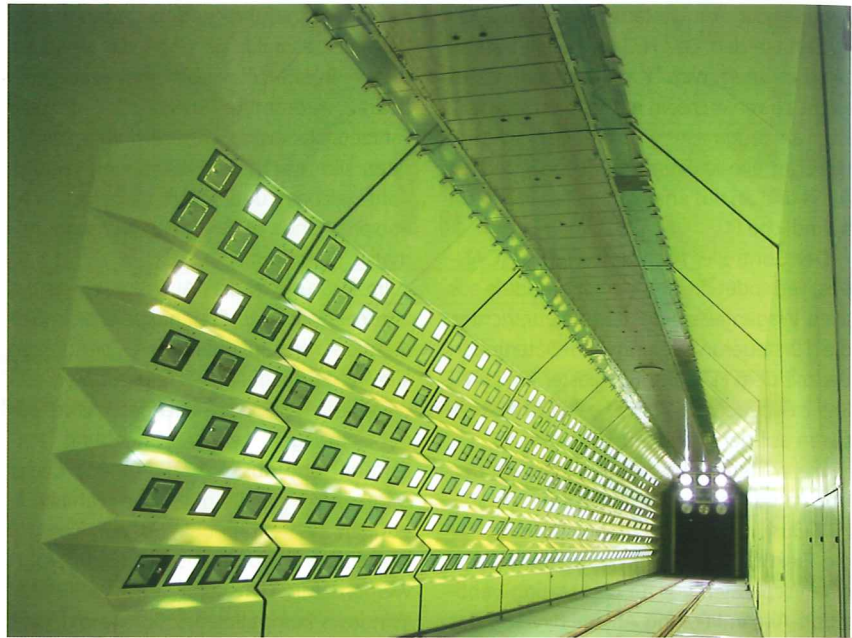


Abb. 1. Der große Klima-Wind-Kanal der Rail Tec Arsenal

## 2. Ermittlung der Leistungskennlinien

Der Energiebedarf wird bei verschiedenen Umgebungs- und Betriebsbedingungen ermittelt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Messung bei einer Außentemperatur von 0 °C, bei 12 km/h Wind (Stillstand, ohne Besetzung) und einer Innenraumtemperatur von 22 °C. Aus der Momentanleistung ist deutlich die Heizungsregelung über die Heizregisterstufen zwischen zirka 32 kW und zirka 54 kW erkennbar. Mit dem ebenfalls gemessenen Energiebedarf wird über den entsprechenden Zeitraum die mittlere Leistungsaufnahme berechnet, die in diesem Fall ca. 42,2 kW beträgt.

Auf diese Weise wird die Leistungsaufnahme bei allen erforderlichen Parameterkombinationen ermittelt. Damit können

temperaturabhängige Leistungskennlinien erstellt werden, die die Basis für weitergehende Berechnungen und Analysen sind.

Abbildung 3 zeigt die an dem untersuchten Reisezugwagen ermittelten Leistungskennlinien.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, wurden im Heizbetrieb (Temperaturbereich - 20 °C bis + 5 °C bzw. + 10 °C) die Versuche mit Sonnenlast nicht durchgeführt, da der Einfluss der Sonnenlast im Winter für die Jahresenergiebedarfsberechnung vernachlässigbar ist.

Im Kühlbetrieb weisen die Leistungskennlinien bis auf den Übergangsbereich (Temperaturbereich + 5 °C bis + 15 °C) und jene Versuche mit Sonne und 12 km/h

Wind (Stillstand) ein sehr ähnliches Verhalten auf. Auch hier wäre eine Reduktion der Versuchsanzahl (Parameterkombination) aufgrund dieser Ergebnisse naheliegend. Da der Verlauf dieser Leistungskennlinien aber sehr vom Fahrzeug und der installierten Klimaanlage abhängt, kann generell nicht auf diese Versuche verzichtet werden.

Viele der für die Energieanalyse als notwendig erachteten Parameterkombinationen der Umgebungs- oder Betriebsbedingungen werden bereits durch vorgesehene Klimaversuche der einschlägigen Normen abgedeckt (Tab. 1), so dass mit der Leistungsdatenermittlung ein Zusatznutzen entsteht.

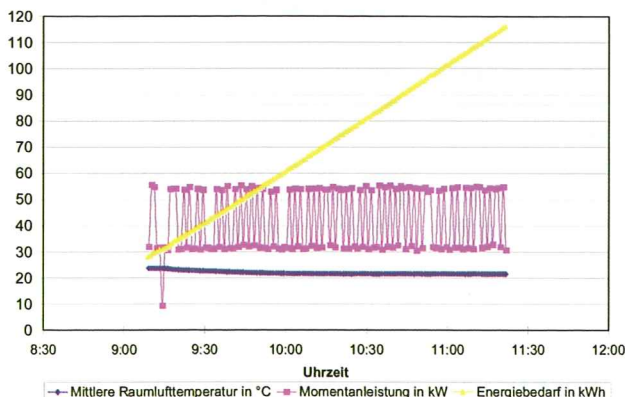


Abb. 2. Energiebedarfsmessung bei einer Außentemperatur von 0 °C, Wind Minimum und ohne Besetzung

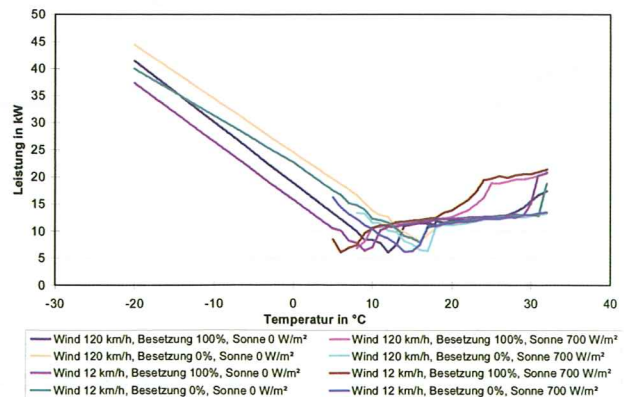


Abb. 3. Leistungskennlinien eines Reisezugwagens in einem Temperaturbereich von - 20 °C bis + 32 °C

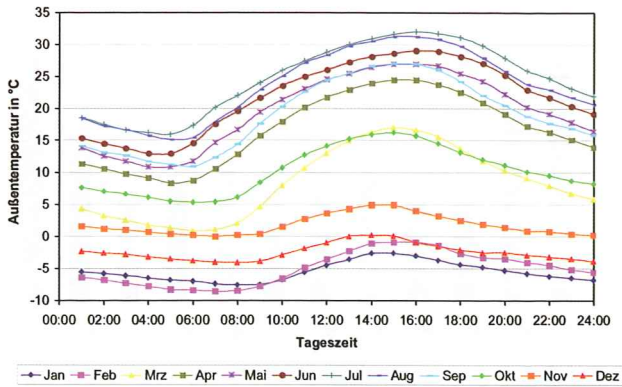


Abb. 4. Mittlere Tagestemperaturverläufe für die Zone 3 gemäß VDI 2078

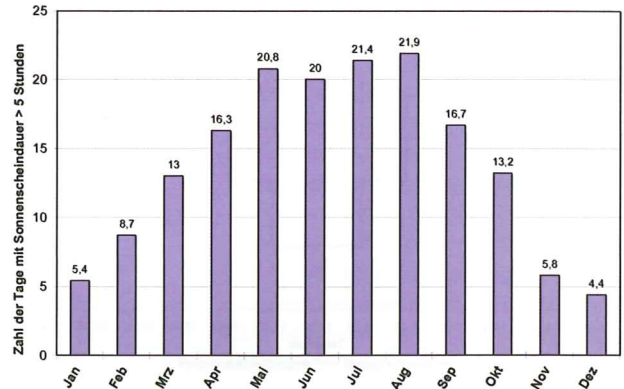


Abb. 5. Durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Monat für Wien

Wie sich aus vorangegangenen Untersuchungen gezeigt hat, sind ergänzende Versuche vor allem im Übergangsbereich zwischen Heizen und Kühlen und mit Sonne erforderlich, um den Leistungskurvenverlauf für verschiedene Lastzustände durchgehend darstellen zu können.

### 3. Klimadaten

Für die Berechnung werden auch die Klimadaten vom Einsatzbereich des Fahrzeuges benötigt. Als zweckmäßig haben sich die mittleren Tagestemperaturverläufe für jeden Monat des Jahres herausgestellt. In Abb. 4 sind dieselben für die Zone 3 (Binnenklima Mitteleuropa) gemäß VDI 2078 dargestellt.

Weiters hat natürlich auch die Anzahl der Sonnentage pro Monat auf die Berechnung einen Einfluss und sollte daher berücksichtigt werden. In dem Berechnungsprogramm sind die Eingabe der Sonnentage sowie die durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Monat möglich. In Abb. 5 ist die Anzahl der Tage mit mehr als fünf Stunden Sonnenschein für Wien dargestellt (Quelle: ZAMG).

### 4. Betriebsbedingungen

Für die Berechnung des Energiebedarfs können als Betriebsbedingungen der Fahrzeugeinsatz, das Fahrgeschwindigkeits- und das Besetzungsprofil vorgegeben werden. Abbildung 6 zeigt ein angenommenes Besetzungsprofil, bei dem der

Besetzungsgrad der Sitzplätze zwischen 30 % und 100 % liegt, was einen mittleren Besetzungsgrad von 56 % entspricht. Der tägliche Fahrzeugeinsatz wurde von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr mit Fahrgeschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 120 km/h angenommen.

### 5. Berechnungsprogramm

Das Prinzipschema zur Berechnung des Energiebedarfs in Abb. 7 verdeutlicht nochmals die oben beschriebene Vorgangsweise.

Zunächst werden mittels Standard-Testprogramm die Leistungskennlinien ermittelt. Mit den Klimadaten und spezifischen Betriebsparametern kann dann der jährliche Energiebedarf kundenspezifisch berechnet werden. Vom Standard-Testprogramm abweichende Parameterkombinationen (Betriebsbedingungen) wie Besetzung und Fahrgeschwindigkeit werden im Programm durch Interpolation entsprechend berücksichtigt.

Weiters ist es natürlich möglich, mit standardisierten Parametern (d. h. gleichen Betriebsbedingungen) die Energieeffizienz von Fahrzeugen oder Ausführungen direkt zu vergleichen. Damit können Optimierungsbemühungen quantitativ nachgewiesen, aber auch Einsparungspotentiale erkannt und analysiert werden. Weiters ist damit die Grundlage dafür gegeben, LCC(Life Cycle Cost)-Angaben objektiv belegen und die Klimatisierung eines Fahrzeuges unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz mittels des so genannten Energy Labelling, der Einstufung in Energieeffizienzklassen A bis G, bewerten zu können.

Tabelle 1. Standard-Testprogramm mit Besetzungsgrad und Umgebungsbedingungen als Parameter

Simulierter Fahrtwind km/h	Sonne W/m <sup>2</sup>	Besetzung %	Außentemperatur in °C				
			- 20	- 10	0	+ 5	+ 32
Stillstand (12 km/h)	0	100	x	x	x	←	x
	700	100				→	x
	0	0	x	x	x	←	x
	700	0				→	x
Jeweilige mittlere Fahrgeschwindigkeit (z. B. 120 km/h)	0	100	x	x	x	←	x
	700	100				→	x
	0	0	x	x	x	←	x
	700	0				←	x

x, x ... konstante Bedingungen, Beharrungszustand  
 ← → ← → ... veränderliche Außentemperatur 3 K/h  
 x ← → ... Versuche in EN 13129 enthalten

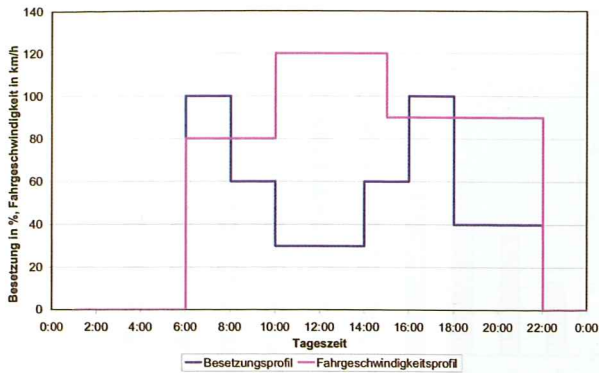


Abb. 6. Angenommenes Besetzungs- bzw. Fahrgeschwindigkeitsprofil

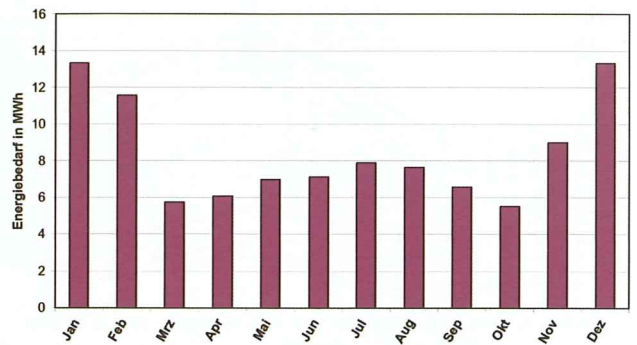


Abb. 8. Monatsbezogene Darstellung des Energiebedarfs

### 6. Energiebedarfsanalyse

Der Jahresenergiebedarf für den untersuchten Reisezugwagen mit den beschriebenen Umgebungs- und Betriebsbedingungen beträgt 100,7 MWh. In Abb. 8 ist der monatliche Energiebedarf grafisch dargestellt.

### 7. Einsparpotentiale

Die Lastberechnung ist die Grundlage für die aufzuwendende Heiz-, Kälte-, Ent- und Befeuchtungsleistung zur thermischen Aufbereitung eines Zuluft-Massestromes, mit dessen Hilfe die thermischen Lasten zu kompensieren sind.

Thermische Lasten entstehen im Raum durch innere und äußere Störgrößen, die sich nachteilig auf den vorgeschriebenen Raumluftzustand auswirken und somit einen wesentlichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Fahrgastraum haben. Störgrößen werden allgemein unterteilt in:

- innere Störgrößen, wie Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe durch den Men-

schen, Wärmeabgabe durch Beleuchtungskörper, Schaltschränke und

- äußere Störgrößen, wie Wärmestrom durch direkte oder diffuse Sonnenstrahlung und Transmission sowie Enthalpie- und Feuchtigkeitsstrom durch ungewollten Luftwechsel.

Wie aus Abb. 9 ersichtlich, wird der Energiebedarf zur Klimatisierung von Schienenfahrzeugen durch viele Faktoren beeinflusst, und hieraus abgeleitet gibt es die unterschiedlichsten Ansätze, den Energiebedarf für die Klimatisierung zu optimieren.

Jedoch sind immer alle singulären Energieeinsparungsmaßnahmen auf ihre gesamtsystemischen Auswirkungen zu untersuchen. Zum Beispiel würde eine stärkere Wärmedämmung des Wagenkastens zwar den Energiebedarf für die Klimatisierung reduzieren, andererseits aber infolge der damit verbundenen Gewichtszunahme des Fahrzeugs einen Mehrbedarf bei der Traktion bedeuten. Bei gesamtenergetischer Betrachtung wäre der Energieeinsparungs-

effekt geringer, oder er würde sich sogar gänzlich aufheben.

Aufgrund der Komplexität der Möglichkeiten und Auswirkungen ist eine gesamtsystemische Betrachtung und Optimierung notwendig, weshalb die Energiebedarfsoptimierung nicht alleinige Aufgabe des Klimalieferanten sein kann.

Die Einsparpotentiale reichen von einfachen Maßnahmen, wie

- besetzungsabhängig geregelte Frischluftmenge,
- intelligente, optimierte Klimaregelung,
- bedarfsbezogene Sollwertanpassung,
- bis hin zu Neukonzepten, wie
- optimierte Wärmedämmung des Wagenkastens und/oder Kanalsystems,
- aktive Isolierung, beispielsweise Nutzung der Abluftwärme zum Erwärmen von Wagenkastenflächen,
- Abluftwärmerückgewinnung,
- lastabhängige Kälteanlage,
- Wärmepumpe.

Auch eine regelmäßige Wartung und die Überprüfung der vorgesehenen Parameter können den Energiebedarf deutlich reduzieren helfen.

Haller und Kreitmayer (Haller, Kreitmayer, 2007) untersuchten bereits zwei Maßnahmen, nämlich die besetzungsabhängige geregelte Frischluftmenge und die Abluftwärme-Rückgewinnung auf ihre Energieeinsparungseffekte bei der Klimatisierung eines Reisezugwagens.

Das Einsparpotential bei der besetzungsabhängigen Regelung wurde mit 8,8 % ermittelt, was durchaus auch die Nachrüstung mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor bei Fahrzeugen überlegenswert macht; sie

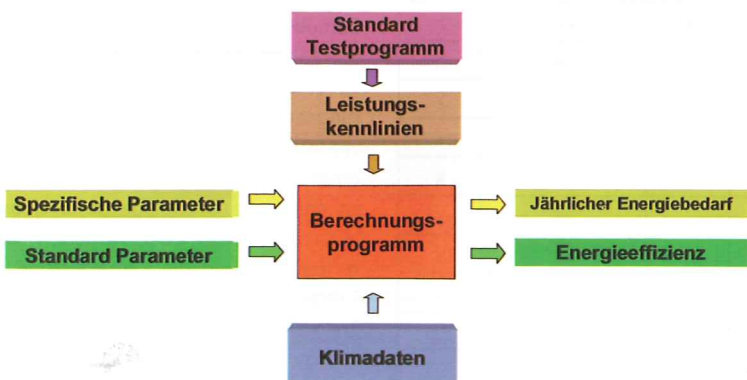


Abb. 7. Prinzipschema für das Berechnen des Energiebedarfs und der Energieeffizienz

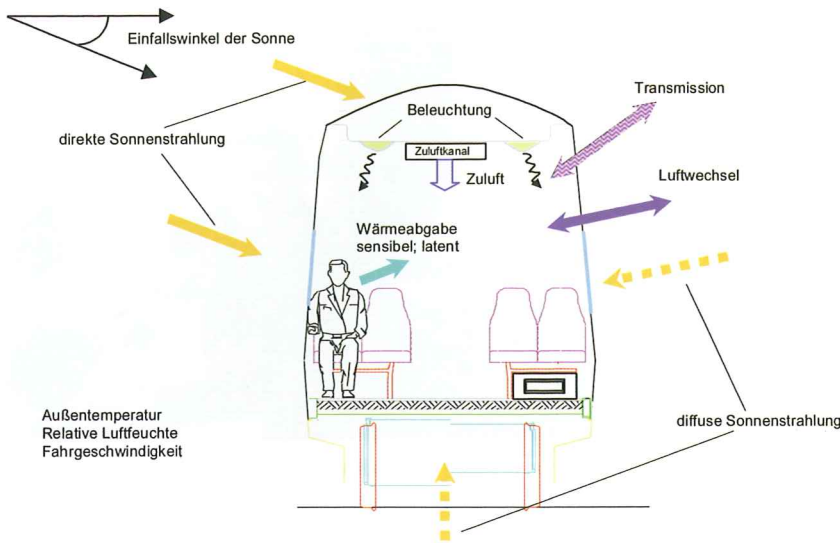


Abb. 9. Schematische Darstellung der Störgrößen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit in einem Fahrgastraum

würde sich bei Vorliegen der notwendigen Voraussetzungen, wie regelbare Frischluftklappe oder programmierbare Steuerung, die bei den meisten moderneren Fahrzeugen vorhanden sind, in kurzer Zeit amortisieren.

Die Abluftwärme-Rückgewinnung ist mit 13,8 % Einsparpotential effizienter und vor allem unabhängig vom Besetzungsgrad. Eine Implementierung ist aber eher nur bei Neufahrzeugen sinnvoll, da hierfür in der Regel das Luftführungskonzept geändert werden muss.

In jeden Fall zeigen die untersuchten Maßnahmen, dass es Einsparpotentiale gibt, die bei konsequenter Umsetzung im Schienenfahrzeugbereich zu nennenswerter Senkung des Gesamtenergiebedarfs und der Emissionen führen würden.

Bei dem gemessenen Reisezugwagen hätten die beiden vorgestellten Maßnahmen ein ähnliches Einsparungspotential.

### 8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Für die Stuserhebung des Energiebedarfs bei der Klimatisierung, aber auch zur Op-

timierung oder Verifizierung von Energieeinsparungsmaßnahmen bietet sich das vorgestellte Standard-Testprogramm in einem Klima-Wind-Kanal an, da damit die erforderlichen Umgebungs- und Betriebsbedingungen eingestellt und exakte Leistungsdaten als Basis für weitere Analysen ermittelt werden können.

Auch kann damit ein konkret geforderter, unter definierten Randbedingungen zu erfüllender Jahresenergiebedarf als Teil der LCC überprüft werden. In weiterer Folge wäre auch die Energieeffizienz der Klimatisierung eines Fahrzeuges mittels eines Energie-Labels bewertbar. Die Einrichtungen von Rail Tec Arsenal ermöglichen es, bei derartigen Untersuchungen einen wichtigen Beitrag zu leisten. Das Ziel all dieser Bemühungen ist es, den Schienenverkehr energieeffizienter zu machen.

### Literatur

Haller G., Kreitmayer M. (2007): Energie-Verbrauchs-analyse und -Einsparungspotentiale bei Klimalanlagen. Elektrische Bahnen 105 (10): 513-520.

### Autoren

Dipl.-Ing. Gabriel Haller, MAS, Ing. Manfred Kreitmayer, Marek Kremen, RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH, Paukenwerkstraße 3, 1210 Wien, Telefon +43 (1) 256 80 81, E-Mail: gabriel.haller@rta.eu, Internet: www.rta.eu

## Die erste Adresse für wissenschaftliche Information

www.springer.at

- Architektur
- Geowissenschaft
- Recht
- Philosophie
- Kunst
- Wirtschaft
- Biologie
- Physik
- Informatik
- Technik
- Mathematik
- Psychotherapie
- Kultur
- Chemie
- Medizin
- Journals

SpringerWienNewYork