

Untersuchungsmethodik zum Fahrvermögen landwirtschaftlicher Transportfahrzeuge

Dr.-Ing. F. Uhlmann, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben-Bornim der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A_{Fr}	m ²	Projektionsfläche des Fahrzeugs in Fahrtrichtung
a	m · s ⁻²	Beschleunigung
c_w	N · s ² · m ⁻⁴	Luftwiderstandsfaktor
e	m	Hebelarm der Stützkraft
F_L	kN	Luftwiderstand
F_R	kN	Rollwiderstand
f_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
F_S	kN	Steigungswiderstand
F_T	kN	Triebkraft
f_T	-	Triebkraftbeiwert
F_v	kN	vertikale Rad- (Achs-) Kraft
F_Z	kN	Zugkraft
f_Z	-	Zugkraftbeiwert
G	kN	Gewichtskraft
g	m · s ⁻²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe über der Fahrbahn
m	kg	Masse
m_N	kg	Nutzmasse
M_T	Nm	Antriebsmoment
r	m	wirksamer Radius
v	m · s ⁻¹	Relativgeschwindigkeit
α	°	Steigungswinkel

1. Problemstellung

Zur Bewertung des Fahrvermögens verschiedener auszuwählender oder zu prüfender Transportfahrzeuge auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wurde bisher keine einheitliche Methode genutzt. Unter Fahrvermögen wird dabei verstanden, daß ein Fahrwerk oder Fahrzeug imstande ist, unter gegebenen äußeren Bedingungen (Fahrbahneigenschaften, Steigungen, usw.) die beabsichtigte Fahrbewegung (entsprechend der Aufgabenstellung des Fahrzeugs) ausführen zu können. Dies ist für verschiedene und sich ändernde Bedingungen zu bewerten. Das Fahrvermögen stellt somit ein wichtiges Kriterium der Einsatzsicherheit dar.

Geht man davon aus, daß der Wirkungsgrad der Leistungsübertragung eines landwirtschaftlichen Zugfahrzeugs (Verhältnis von Zugleistung und Motorleistung) etwa maximal 0,5 bis 0,55 beträgt und sich die Verluste auf Antriebsstrang und Kraftübertragung Reifen - Boden etwa wie 1:2 bis 1:2,5 verhalten [1], so erkennt man die Bedeutung von Untersuchungsergebnissen zum Problem Reifen - Boden. Ein steiler Anstieg der Triebkraft-Schlupf-Kurve und ein geringer Rollwiderstand sind Voraussetzungen für einen günstigen Übertragungswirkungsgrad zwischen Fahrwerk und Boden [2].

Nachfolgend soll gezeigt werden, welcher Kennwert zur Charakterisierung des Fahrvermögens von landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen am aussagefähigsten ist.

2. Stand der Erkenntnisse

Steinkampf [3] zeigt die Problematik bei der Entwicklung von leistungsfähigen landwirtschaftlichen Traktoren auf, die weitestgehend auch für Transportfahrzeuge zutrifft:

- Die Zugkraft steigt auf Reibungsböden mit der Last auf den treibenden Achsen.
- Zur gleichen Vergrößerung von Masse und Reifenaufstandsfläche müssen die Reifen überproportional vergrößert werden, da bei der Vergrößerung der Abmessungen von Fahrzeugen die Masse in der

dritten Potenz, die Reifenaufstandsfläche aber nur in der zweiten Potenz wächst.

- Zur Erzielung einer hohen Zugkraft sind große, schmale Reifen in den meisten Fällen wirkungsvoller als kleine, breite Reifen.

- Größere Reifendurchmesser bewirken höhere erforderliche Radmomente und einen höheren Schwerpunkt.

- Eine Erhöhung der Tragfähigkeit ist kostengünstiger über eine Reifenverbreiterung zu erreichen.

- Breite -Reifen haben eine schlechtere Selbstreinigung.

- Triebkraft und Übertragungswirkungsgrad eines AS-Reifens steigen auf relativ trockenen, tragfähigen Böden mit der Radlast.

Bei Traktoren kann das Fahrvermögen durch folgende, bedingt variable Parameter der Triebräder beeinflusst werden:

- Radlast
- Reifeninnendruck
- Reifenabmessungen
- Karkassenbauart
- Profilstaltung (Höhe, Winkel und Abstand der Stollen).

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge (Motorleistung, Zugkraft, zulässige Gesamtmasse) wird aus Gründen der erforderlichen Tragfähigkeit der Reifen, des Auflagedrucks, der Bodenverdichtung bis in größere Bodentiefen, der maximal zulässigen Fahrzeugabmessung, der Schwerpunkthöhe und der Getriebebeanspruchung der Variationsspielraum dieser Parameter weitgehend eingeschränkt. Variabel sind vor allem noch Karkassenbauart und Profilstaltung.

Die bisher veröffentlichten Ergebnisse beziehen sich in ihren Aussagen nur auf Triebdrädeifen von Traktoren bei relativ geringen Achslasten (rd. 20 kN) und niedrigen Reifeninnendrücken (bis rd. 150 kPa). Rückschlüsse auf höher belastete LKW-Reifen für kombinierte Feld-Straße-Transporte sind nicht gesichert, da zu derartigen Reifen und Fahrwerk

keine Untersuchungsergebnisse zugänglich waren.

Bisherige Reifenuntersuchungen haben gezeigt, daß aus ihren Ergebnissen das Fahrvermögen von konkreten Fahrzeugen nur mit geringer Sicherheit abgeschätzt werden kann.

3. Bisherige Prüfung kompletter Fahrzeuge

Für den Vergleich verschiedener Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Treib- und Rolleigenschaften wurden bisher oft Serienmaschinen mit entsprechenden Meß- und Bremseinrichtungen ausgerüstet und untersucht.

Bock, Drexler und Coolman (in [4]) beschreiben die Versuchsdurchführung bei derartigen Untersuchungen.

Für die Prüfung von Traktoren (Zugkraft, Rollwiderstand, Schlupf, Motordrehzahl, Wasser-, Öl- und Lufttemperatur u. a.) werden in der UdSSR fahrbare Laboratorien eingesetzt. Sie sind je nach Zugkraftklasse der Traktoren auf den LKW „ZIL-157“, „KRAZ-214 B“ oder auf einem Kettentraktor aufgebaut [5].

Terpsta und Maanen (in [4]) bestimmten die maximale Zugkraft von Traktoren mit verschiedenen Bereifungen. Für die Messungen wurde an den vorderen, zu prüfenden Traktor ein Traktor mit Anhänger zum Bremsen angehängt. Die auftretende Kraft in der rd. 4 m langen Zugkette zwischen beiden Traktoren wurde mit Hilfe eines hydraulischen Zugkraftmessers registriert.

Zur Kennzeichnung des Zugverhaltens von zu prüfenden Traktoren werden in der DDR die Zugkraft-Schlupf-Kurven auf fester Fahrbahn und auf ein oder zwei Bodenbedingungen ermittelt. Diese Ergebnisse können untereinander nicht verglichen werden.

Zu den Werten, mit denen das Fahrvermögen von Gelände- und Militärkraftfahrzeugen gekennzeichnet wird, gehören nach [6]:

- Zugkraftbeiwert f_Z oder mögliche Zugkraft F_Z auf ebener Fahrbahn
- Steigung, die von einem Fahrzeug überwunden werden kann (als Beispiel in Tafel 1 dargestellt)

- geometrische Faktoren (Bodenfreiheit, Bauchfreiheit, Überhangwinkel, Verschränkbarkeit der Achsen, Raddurchmesser u. a.)

- konstruktive Faktoren (Radauflagedruck, Achslast, Hangtauglichkeit, Reifenbauart, Triebachslastanteil, Radformel, Art der Kraftübertragung, Sperrbarkeit der Ausgleichsgetriebe u. a.).

Dabei ist zu beachten, daß diese Kennwerte untereinander verknüpft sind.

4. Geometrische Einschränkungen des Fahrvermögens

Die geometrischen Parameter des Fahrwerks und des Gesamtfahrzeugs können das Fahrvermögen auf unebenen Fahrbahnen und über Hindernisse begrenzen.

Wichtige geometrische Kenngrößen der Fahrzeuge sind:

- Lage des Fahrzeugschwerpunkts entsprechend dem Beladezustand

Tafel 1. Ergebnis des Vergleichs des maximal erreichbaren Steigungswinkels als Methode zur Kennzeichnung des Fahrvermögens [4]

Fahrzeugkombination (Fzk)	Grenze des Fahrrens an der Steigung %	Nutzmasse an Fzk t	Bruttomasse der Fzk t
D 4 KB + THK 12	9 ... 12,5	10	19,8
D 4 KB + HW 80 W 50	6 ... 10	7,5	17,1
LA/Z(ND) + HW 60	5 ... 8	10,5	19,1
ZT 300 + HW 80 W 50	6 ... 8	7,5	17,2
LA/Z(HD) + HW 60	4 ... 6	10,5	19,1

Bedingungen: schwerer Lößlehm (Lommatzcher Pflege), Sommerzwischenfrucht abgeerntet, sehr feucht

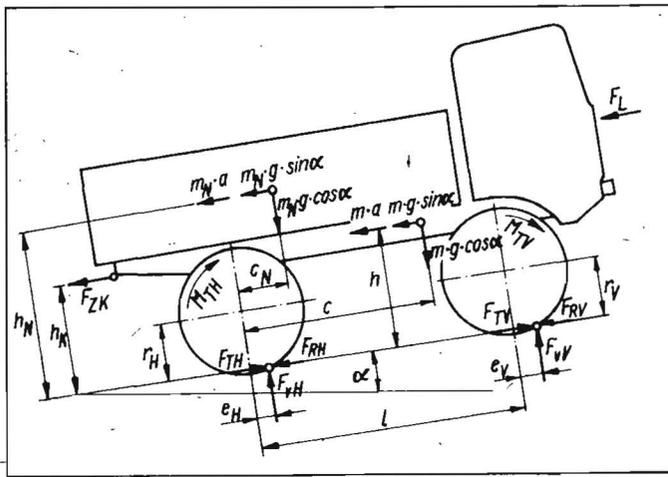


Bild 1
Kräfte am geradeaus fahrenden Transportfahrzeug

Gülle) oder die getrennte Betrachtung von Zugmittel und Anhängerfahrzeug.

Beschleunigung a

In der Praxis muß die Beschleunigung des Fahrzeugs bei der Fahrt neben der Erntemaschine oder aus dem Stand gewährleistet sein. Das erfordert neben der notwendigen Motorleistung eine Reserve an Triebkraft unter allen Einsatzbedingungen.

Betrachtet man ein Fahrzeug auf der Ebene bei einer konstanten Geschwindigkeit und vernachlässigt den Luftwiderstand, so ist

$$F_T = F_R + F_Z \quad (4)$$

Transportfahrzeuge mit $F_Z = 0$ müssen unter diesen Bedingungen sichern, daß $F_T \geq F_R$ ist. Das Fahrvermögen ist um so günstiger einzuschätzen, je größer die Differenz zwischen möglicher Triebkraft und vorhandenem Rollwiderstand ist. Es ist bekannt, daß die Triebkraft und der Rollwiderstand von den vertikalen Radkräften abhängig [F_T ; $F_R = f(F_V)$] und der Steigungswiderstand sowie die erforderliche Kraft zur Beschleunigung der Gesamtmasse des Fahrzeugs proportional sind [F_S ; $m \cdot a = f(m)$]. Somit sind alle wesentlichen Einflußfaktoren auf die Differenz zwischen möglicher Triebkraft und den Fahrwiderständen für landwirtschaftliche Transportfahrzeuge von den Radkräften oder von der Gesamtmasse der Fahrzeuge abhängig. Zum Vergleich des Fahrvermögens sollten deshalb nur Beiwerte ($F/m \cdot g$) bei kompletten Fahrzeugen oder F/F_V bei einzelnen Rädern und Achsen benutzt werden.

Im praktischen Fahrbetrieb wird sich der Schlupf und somit die Triebkraft entsprechend dem Rollwiderstand und anderen Fahrwiderständen einstellen. Zur meßtechnischen Bestimmung der möglichen Triebkraft müssen die Fahrwiderstände verändert werden können, bis sie die mögliche Triebkraft erreichen. Ermittelt man die mögliche Zugkraft F_Z der Fahrzeuge bei einer geringen konstanten Geschwindigkeit auf der Ebene durch einen variablen Zugwiderstand, so ist

$$F_Z = F_T - F_R \quad \text{oder} \quad (5)$$

$$f_z = f_T - f_R \quad (6)$$

bestimmt man die maximal befahrbare Steigung, so ist

$$\sin \alpha = \frac{F_T}{m \cdot g} - \frac{F_R}{m \cdot g} \quad (7)$$

Dabei ist zu beachten, daß bei nicht allradangetriebenen Fahrzeugen f_z und $\sin \alpha$ durch die auftretenden Achslastverlagerungen und die damit veränderten vertikalen Kräfte der Triebräder nicht unmittelbar vergleichbar sind.

Die Differenz zwischen möglichem Triebkraftbeiwert und den Beiwerten der Fahrwiderstände ist somit das wesentlichste Maß zur Einschätzung des Fahrvermögens von Transportfahrzeugen [4].

6. Bewertung des Fahrvermögens verschiedener Transportfahrzeuge

Die Fahrwiderstände (außer Luftwiderstand) sind vor allem von den Fahrbahnbedingungen und von der Gesamtmasse des Fahrzeugs abhängig. Triebkraft und Rollwiderstand werden außerdem von der jeweiligen Fahrwerkskonzeption und -gestaltung bestimmt.

Die Bewertung des Fahrvermögens soll folgendes sichern:

- Vergleichbarkeit von Fahrzeugen unterschiedlicher Masse

- Bodenfreiheit
- Bauchfreiheit, vorderer und hinterer Überhangwinkel
- Schwenkwinkel von Zug- und Anhängerfahrzeug gegeneinander in allen drei Achsen und Verschränkbarkeit der Achsen.

Weitere Parameter spielen in der Militärtechnik eine Rolle [6], sind jedoch im Bereich des landwirtschaftlichen Transports nicht so bedeutungsvoll.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, daß die geometrischen Parameter bei Einhaltung von gewissen, teilweise in Standards festgelegten Grenzwerten das Fahrvermögen landwirtschaftlicher Transportfahrzeuge nicht oder unwesentlich einschränken.

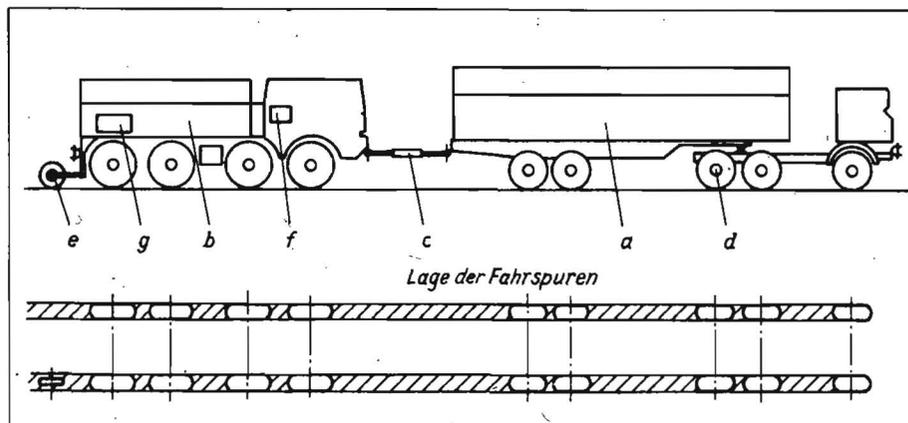
5. Kräfte am landwirtschaftlichen Transportfahrzeug

Die Triebkraft F_T eines geradeaus fahrenden Fahrzeugs muß den Rollwiderstand F_R , den Steigungswiderstand F_S , den Luftwiderstand F_L und erforderliche Zugkräfte F_Z überwinden und eine Beschleunigung a ermöglichen (Bild 1). Vernachlässigt man das Trägheitsmoment der rollenden Räder und des Antriebs, so muß für die Fortbewegung gesichert sein:

$$F_T \geq F_R + F_S + F_L + F_Z + m \cdot a \quad (1)$$

Dabei wird davon ausgegangen, daß durch eine zweckentsprechende Wahl von Antriebsquelle und Getriebe in jedem Fall ausreichende Raddrehmomente zur Verfügung stehen.

Bild 2. Aufbau der Meßtechnik bei der Ermittlung der Zugkraft F_Z :
a untersuchte Fahrzeugkombination, b Brems- und Zugfahrzeug, c Meßstange, d Impulsgeber (Triebbrad), e Impulsgeber (Meßrad), f Verstärker, Filter und Registriergeräte, g Notstromaggregat



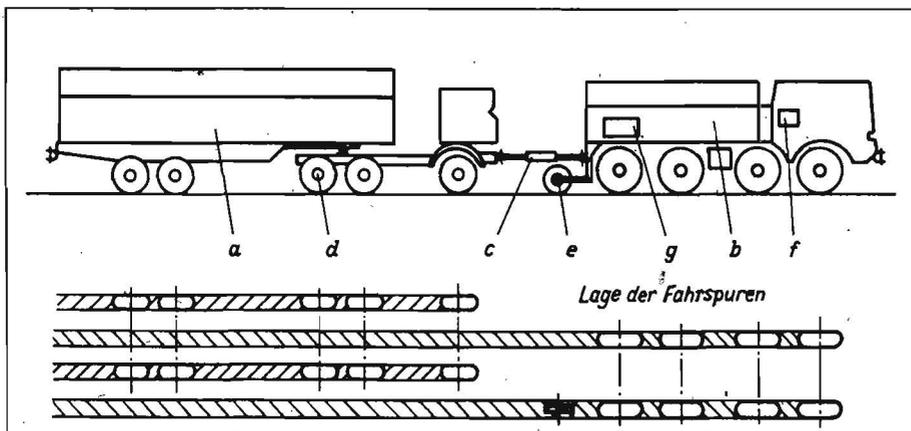


Bild 3. Aufbau der Meßtechnik bei der Ermittlung des Rollwiderstands F_R (s. a. Bild 2)

- Bildung von Durchschnittswerten von Versuchen auf mehreren Standorten und Bodenbedingungen
- Nutzung von Fahrzeugen mit bekanntem Fahrvermögen als Maßstab
- geringer Einfluß der Fertigkeiten des Fahrers auf das Ergebnis
- Kennzeichnung der häufigsten Fahrzeugstände.

Die Analyse der Kräfte am Fahrzeug zeigt, daß beim Vergleich von Beiwerten die unterschiedlichen Fahrzeugmassen berücksichtigt werden:

Zum Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Fahrbahnbedingungen gibt es bisher noch keine allgemeingültige Methode, den

Boden aus fahrmechanischer Sicht zu charakterisieren.

Deshalb wird folgendes empfohlen:

- Bewertung des Fahrvermögens von verschiedenen Fahrzeugen für bestimmte Fahrbahnbedingungen bei Geradeausfahrt, vor allem durch den Vergleich der ermittelten Zugkraftbeiwert-Schlupf-Kurven (Meßmethodik s. [7]; s. a. Bilder 2 und 3)
- Vergleich des Fahrvermögens von mehreren Fahrzeugen auf verschiedenen Fahrbahnbedingungen durch die Gegenüberstellung der auf ein Fahrzeug bezogenen maximalen Zugkraftbeiwerte bis 20 % Schlupf.

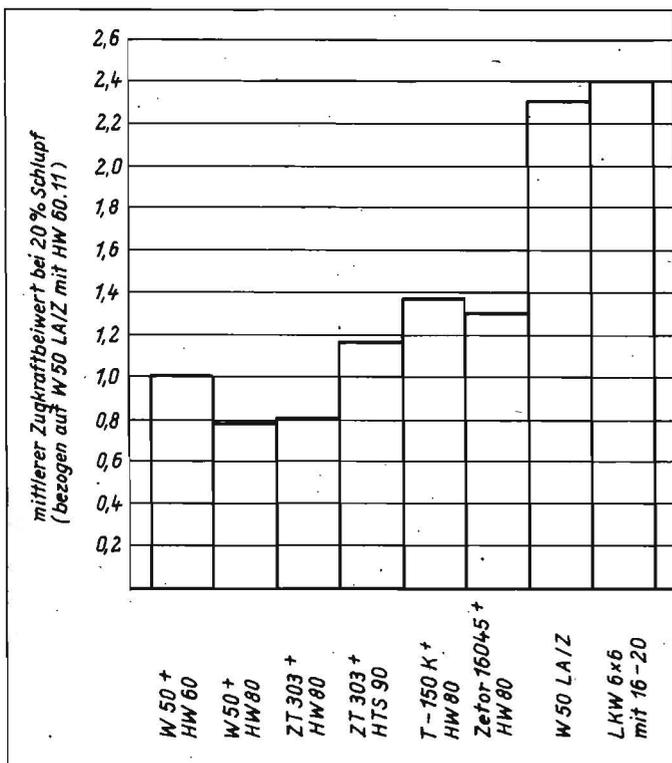


Bild 4. Vergleich des Zugkraftbeiwerts verschiedener Fahrzeuge, bezogen auf W 50 LA/Z mit HW 60.11 [4]

Dazu sind bei allen Versuchen das Bezugsfahrzeug und möglichst alle anderen zu vergleichenden Fahrzeuge zu untersuchen. Außerdem empfiehlt es sich, wegen der unterschiedlichen Wirkverhältnisse bei hochbelasteten (LKW-) und relativ niedrig belasteten (Traktoren-)Fahrwerken für Transportfahrzeuge zwei verschiedene Bezugsfahrzeuge zu nutzen. Für die DDR wird vorgeschlagen, die ermittelten Zugkraftbeiwerte von Transportmitteln bei 20 % Schlupf auf die des W50 LA/Z mit HW 60.11 und ZT 303 mit HW 80.11 zu beziehen und entsprechend gegenüberzustellen (Bild 4).

7. Zusammenfassung

Gegenüber vielen anderen Kriterien ist der Zugkraftbeiwert in Abhängigkeit vom Schlupf zur Bewertung des Fahrvermögens von landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen bei Geradeausfahrt besonders aussagefähig. Ausgehend vom derzeitigen Erkenntnisstand zum Problem Rad - Boden, vor allem von den Unklarheiten des Verhaltens hochbelasteter Reifen auf weichem Boden, wird empfohlen, den ermittelten Zugkraftbeiwert auf ein Basisfahrzeug zu beziehen. Durch diesen Bezug ist der Vergleich von Meßergebnissen auf verschiedenen Standorten möglich und die Vergleichbarkeit zu anderen bekannten Fahrzeugen gesichert. Durch die Anwendung dieser Methode kann das Fahrvermögen von vorhandenen Transportfahrzeugen auf weichem Boden auf der Grundlage von Zugkraft- und Rollwiderstandsmessungen exakt bewertet werden. Zur Einschätzung und Bewertung projektierter Fahrzeuge und für allgemeingültige Aussagen sind weiterhin Einzelraduntersuchungen und dgl. erforderlich.

Literatur

- [1] Testing times. Power. Farming, London, 57 (1978) 10, S. 23 u. 26.
- [2] Analyse des gegenwärtigen Standes und Einschätzung der Aggregatentwicklung. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Zwischenbericht 1977 (unveröffentlicht).
- [3] Steinkampf, H.: Problematik der Leistungsumwandlung über die Triebäder bei leistungsstarken Schleppern. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 27 (1977) 5, S. 168-172.
- [4] Uhlemann, F.: Beitrag zur Bewertung des Fahrvermögens von Transportfahrzeugen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Dissertation 1982 (unveröffentlicht).
- [5] Rappoport, D. M., u. a.: Dinamometričeskie laboratorii NATI (Kraftmeßlaboratorien des NATI). Traktory i sel'chozmašiny, Moskva (1967) 9, S. 9-12.
- [6] Autorenkollektiv: Militärkraftfahrzeuge. Berlin: Militärverlag der DDR 1975.
- [7] Recker, W.; Richter, R.; Uhlemann, F.: Zugkraft- und Rollwiderstandsmessungen an landwirtschaftlichen Fahrzeugen. agrartechnik, Berlin 30 (1980) 1, S. 12-14.

A 3670

KATALOG

über die lieferbare und in Kürze erscheinende Literatur des VEB VERLAG TECHNIK kostenlos erhältlich durch jede Fachbuchhandlung oder direkt durch den Verlag, Abteilung Absatz-Werbung