

Pack, Ludwig

Working Paper

Der Einfluß der Faktorpreise auf die optimale Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen: Eine empirisch fundierte kostentheoretische Analyse

Diskussionsbeiträge - Serie C, No. 5

Provided in Cooperation with:

Department of Economics, University of Konstanz

Suggested Citation: Pack, Ludwig (1984) : Der Einfluß der Faktorpreise auf die optimale Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen: Eine empirisch fundierte kostentheoretische Analyse, Diskussionsbeiträge - Serie C, No. 5, Universität Konstanz, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Statistik, Konstanz

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/92538>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

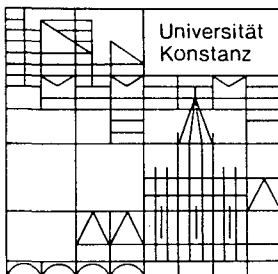
Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



**Fakultät für
Wirtschaftswissenschaften
und Statistik**

Ludwig Pack

**Der Einfluß der Faktorpreise auf
die optimale Fahrgeschwindigkeit
von Kraftfahrzeugen —
Eine empirisch fundierte
kostentheoretische Analyse**

Diskussionsbeiträge

DER EINFLUSS DER FAKTORPREISE AUF
DIE OPTIMALE FAHRGESCHWINDIGKEIT VON
KRAFTFAHRZEUGEN - EINE EMPIRISCH
FUNDIERTE KOSTENTHEORETISCHE ANALYSE

Ludwig | Pack

Serie C - Nr. 5

As 1322 84
Wetterstation
Kfz

Januar 1984

C122983

Serie A: Volkswirtschaftliche Beiträge

Serie B: Finanzwissenschaftliche Arbeitspapiere

Serie C: Betriebswirtschaftliche Beiträge

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen	3
Verzeichnis der Tabellen	4
<u>Kapitel 1: Zielsetzung und Problemstellung</u>	7
<u>Kapitel 2: Theoretische Grundlagen</u>	11
I. Die Kostenentwicklung bei zeitlicher Anpassung	12
II. Die Kostenentwicklung bei intensitätsmäßiger Anpassung	14
III. Die Kostenentwicklung bei optimaler Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung	16
<u>Kapitel 3: Allgemeine Übertragung der theoretisch gewonnenen Erkenntnisse auf die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen</u>	21
I. So geht es nicht	22
II. Die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Zwei-Faktoren-Modell	24
1. Die benötigten Grundbegriffe und ihre Symbole	24
2. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit, wenn Zeitlohn gezahlt wird	29
3. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Zwei-Faktoren-Modell, wenn Akkordlohn gezahlt wird	31
a) Die Situation bei Zahlung von Stückakkord	31
b) Die Situation bei Zahlung von Stückzeitakkord	33
4. Kostentheoretische Verallgemeinerung der aufgezeigten Zusammenhänge	34
III. Darstellung des Zwei-Faktoren-Falls anhand eines Zahlenbeispiels	37
1. Die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit	37
a) Der Fall, daß Zeitlohn gezahlt wird	37
b) Der Fall, daß Akkordlohn gezahlt wird	49
2. Bestimmung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer	50
3. Sensitivitätsanalyse mit Hilfe der Variabilität der Kosten durch Berechnung von Proportionalitätsabweichungen	55

	Seite
a) Die Reaktion der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit	55
b) Die vorgegebenen prozentualen Steigerungen der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer entsprechenden höchstzulässigen Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit	60
<u>Kapitel 4:</u> Praktische Anwendung der gewonnenen theoretischen Erkenntnisse auf den Zwei-Faktoren-Fall	64
I. Die optimale Fahrgeschwindigkeit	67
II. Die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer	71
III. Wie sensitiv reagieren die entscheidungsrelevanten Kosten auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit?	73
1. Die Reaktion der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit	74
2. Die vorgegebenen prozentualen Steigerungen der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer entsprechenden höchstzulässigen Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit	79
<u>Kapitel 5:</u> Zwei kostentheoretische Auswertungen der gewonnenen Erkenntnisse im Zwei-Faktoren-Fall	84
I. Die bisherige Darstellung der Kosteneinflußgröße Faktorpreise	85
II. Die Stellung der Faktorpreise in der vorliegenden Untersuchung	86
III. Der Einfluß variierender Faktorpreise auf die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung und auf die Kosten	87
1. Die Abhängigkeit der Kosten von der Produktmenge	89
2. Die Abhängigkeit der Kosten von den Faktorpreisen	92
<u>Kapitel 6:</u> Ausdehnung der Analyse auf den Vier-Faktoren-Fall	94
I. Die Verbrauchsfunktionen für Öl und Reifenabrieb	94
II. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Vier-Faktoren-Fall	97
Schlußbemerkungen	101

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abb. 1: Die Abhängigkeit der Kosten von der Leistungszeit bei alternativ vorgegebenen Leistungsintensitäten	13
Abb. 2: Abhängigkeit des Faktorverbrauchs und der Faktorkosten von der Leistungsintensität x und der Produktmenge M bei alternativ vorgegebenen Leistungszeiten t	14
Abb. 3: Die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung bei steigender Produktmenge	20
Abb. 4: Die Bestimmung des "idealen Spar-Tempos" (IST) nach Brezing	22
Abb. 5: Die den spezifischen Kraftstoffverbrauch definierende Funktion $r_1(x) = \frac{1}{1250} x^2 - \frac{1}{50} x + 8 \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$	38
Abb. 6: Graphische Bestimmung der optimalen Kombination von Fahrzeit und Fahrgeschwindigkeit	40
Abb. 7: Graphische Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit unter Verwendung von Kriterium (7)	43
Abb. 8: Graphische Bestimmung der Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit, die höchstens zulässig sind, wenn eine vorgegebene Steigerung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten von 100% nicht überschritten werden darf	61
Abb. 9: Für die Tab. 12 und 13 relevante Zusammenhänge, wenn $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$	77
Abb. 10: Für die Tab. 14 und 15 relevante Zusammenhänge, wenn $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$	82
Abb. 11: Die entscheidungsrelevanten Kosten K_e^2 in Abhängigkeit von der Fahrstrecke M und dem Verhältnis aus Lohnsatz π_2 und Kraftstoffpreis π_1	90
Abb. 12: Die Abhängigkeit der entscheidungsrelevanten Kosten K_e^2 von der Fahrstrecke M bei alternativ vorgegebenen Werten von $\pi_2 : \pi_1$	91
Abb. 13: Die Abhängigkeit der entscheidungsrelevanten Kosten K_e^2 vom Verhältnis zwischen Lohn π_2 und Kraftstoffpreis π_1 bei gegebener Fahrstrecke	93

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tab. 1: Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis π_1 und vom Stundenlohn π_2 bei Zeitlohn	47
Tab. 2: Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\pi_2:\pi_1$ [l/Std]	48
Tab. 3: Die minimale kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge bei Zeitlohn	52
Tab.3A: Die minimale kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge bei Akkordlohn	54
Tab. 4: Die kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\frac{\pi_2}{\pi_1}$, wenn die Fahrgeschwindigkeit um 100 $\alpha\%$ von der optimalen Fahrgeschwindigkeit abweicht.	56
Tab. 5: Die durch eine gegebene prozentuale Unterschreitung ($-\alpha$) bzw. Überschreitung ($+\alpha$) der als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeit verursachte prozentuale Steigerung der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer ($p(\alpha)$ in Prozent der letzteren) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\frac{\pi_2}{\pi_1}$ [$\frac{1}{Std}$] bei Zeitlohn	59

Tab. 6: Fahrgeschwindigkeiten, welche nicht unterschritten (x^-) bzw. nicht überschritten (x^+) werden dürfen, wenn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer von 100 p% bei Zeitlohn nicht überschritten werden darf	63
Tab. 7: Prozentuale Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit, welche höchstens zulässig sind, wenn bei Zeitlohn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer nicht überschritten werden soll. Dabei gibt α^+ die höchstzulässige Überschreitung, α^- die höchstzulässige Unterschreitung der optimalen Fahrgeschwindigkeit in Prozent der letzteren an	63
Tab.8a: Firmenangaben über den Teillastverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit in l/100 km	65
Tab.8b: Aus Tab. 8a errechnete Koeffizienten der Verbrauchsfunktion $r_i(x)$ in l/100 km	66
Tab. 9: Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis π_1 und vom Stundenlohnsatz π_2 bei Zeitlohn	68
Tab. 10: Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge	69
Tab. 11: Die minimale kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge bei Zeitlohn	72
Tab. 12: Die kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stunden-	

lohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\pi_2:\pi_1$,
wenn die Fahrgeschwindigkeit um 100 $\alpha\%$ von
der optimalen Fahrgeschwindigkeit abweicht
und Zeitlohn bezahlt wird

75

Tab. 13: Die durch eine gegebene prozentuale Unter-
schreitung (negatives α) bzw. Überschrei-
tung (positives α) der als optimal ermit-
telten Fahrgeschwindigkeit verursachte pro-
zentuale Steigerung der entscheidungsrele-
vanten Kosten pro gefahrenen Kilometer
($p(\alpha)$ in Prozent der letzteren) in Abhän-
gigkeit von der stundenlohnäquivalenten
Kraftstoffmenge $\pi_2:\pi_1$ bei Zeitlohn

76

Tab. 14: Fahrgeschwindigkeiten, welche nicht über-
schritten (x^+) bzw. nicht unterschritten
(x^-) werden dürfen, wenn eine vorgegebene
prozentuale Zunahme der entscheidungsrele-
vanten variablen Kosten pro gefahrenen Ki-
lometer von 100 p% bei Zeitlohn nicht
überschritten werden dürfen

80

Tab. 15: Prozentuale Abweichungen von der optima-
len Fahrgeschwindigkeit, welche höchstens
zulässig sind, wenn bei Zahlung von Zeit-
lohn eine vorgegebene prozentuale Zunahme
der minimalen entscheidungsrelevanten
Kosten pro gefahrenen Kilometer von 100 p%
nicht überschritten werden soll. Dabei gibt
 α^+ die höchstzulässige Überschreitung, α^-
die höchstzulässige Unterschreitung der
optimalen Fahrgeschwindigkeit in Prozent
der letzteren an

81

Tab. 16: Numerische Werte, welche die Abbildungen
11, 12 und 13 definieren

88

Kapitel 1: Zielsetzung und Problemstellung

Die folgende Analyse verfolgt ein doppeltes Ziel: Einerseits soll versucht werden, die wichtigsten von der Fahrgeschwindigkeit eines Kraftfahrzeugs abhängigen (und insofern entscheidungsrelevanten) Kostenarten empirisch fundiert durch explizite Kostenfunktionen zu beschreiben. Andererseits soll von diesen Funktionen ausgehend die optimale Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen in Abhängigkeit von variierenden Faktorpreisen numerisch bestimmt und dadurch die Bedeutung der Kosteneinflußgröße "Faktorpreise" herausgearbeitet werden. Da Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit sich bei gegebener Fahrstrecke gegenseitig definieren, sollen dabei am betrachteten Beispiel Erkenntnisse darüber gewonnen werden, in welchem Umfang die Faktorpreise die Beschäftigung von Arbeitskräften bestimmen, wenn ein steigender Preis des Faktors menschliche Arbeit, d.h. steigende Löhne, zu einer Substitution von Arbeitszeit durch Arbeitsgeschwindigkeit führt und zur Folge hat, daß menschliche Arbeit peripher durch andere Faktoren, vor allem durch Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe ersetzt wird.

Eine der wichtigsten, wenn nicht die wichtigste Aufgabe der Produktionstheorie überhaupt ist die Ableitung von Grundregeln der optimalen Faktorkombination. Grundlegend für alle in diese Richtung führenden Überlegungen ist das Konzept der Minimalkostenkombination. Weil die Gesamtkostenfunktion in der Form, wie sie in der Mikroökonomie und in der betriebswirtschaftlichen Kostentheorie üblicherweise verwandt wird, ausschließlich auf Minimalkostenkombinationen aufbauen muß, wenn sie eindeutig sein soll, befassen sich die folgenden Ausführungen mit einer wesentlichen Grundlage der Kostentheorie. Da die Kostentheorie ihrerseits grundlegende Erkenntnisse für die Preistheorie, die Produktionsprogramm- und Produktionsablaufplanung sowie für die Kostenrechnung bereitstellen muß, sind auch diese Gebiete tangiert.

Ein Blick in die Praxis zeigt, daß in der industriellen Produktion die zeitliche Anpassung die am häufigsten verwandte Form der Anpassung an Veränderungen der Beschäftigung ist. Insofern kommt der zeitlichen Anpassung im Rahmen einer entscheidungsorientierten Kostentheorie zentrale Bedeutung zu, und zwar auch dann, wenn ein Betrieb die Möglichkeit hat, zeitliche und intensitätsmäßige Anpassung miteinander zu kombinieren.

Unter Berücksichtigung des zuvor Gesagten muß man sich etwas darüber wundern, daß auf exakten, empirisch gewonnenen bzw. auf technisch determinierten Kostenfunktionen aufbauende Untersuchungen über die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung bisher weitgehend fehlen.¹⁾

Dabei legen es doch das von Gutenberg bereits 1951 erstmals vorgestellte Konzept der Verbrauchsfunktion und ihre Einbeziehung in die Produktionsfunktion vom Typ B sowie Gutenbergs Konzept der Anpassungsprozesse nahe, derartige Zusammenhänge auf der Basis von technisch determinierten Verbrauchsfunktionen und den daraus ableitbaren Kostenfunktionen zu analysieren. Dies umso mehr, als auf dem Weg über die Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung das Problem der Faktorsubstitution empirische Relevanz erlangt, und zwar in einem Ausmaß, das es in Form der direkten peripheren Faktorsubstitution nie besessen hat, wie Gutenberg in seiner Kritik am Ertragsgesetz und der darauf aufbauenden Produktionsfunktion vom Typ A nachgewiesen hat.

Das Kraftfahrzeug stellt dabei ein geradezu ideales Anwendungsbeispiel für die empirische Untersuchung der Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung dar. Eine bestimmte Entfernung kann mit unterschiedlichen Kombinationen von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit zurückgelegt werden, wobei unterschiedlichen Kombinationen verschieden hohe Kosten zugeordnet sind. Die Variation der Fahrgeschwindigkeit stellt dabei intensitätsmäßige, die Variation der Fahrzeit zeitliche

¹⁾ Interessante empirische Grundlagen für eine solche Untersuchung finden sich bereits bei E. Heinen, "Anpassungsprozesse und ihre kostenmäßigen Konsequenzen, dargestellt am Beispiel des Kokereibetriebs", Köln und Opladen 1957, v.a. S. 76-101.

Anpassung dar. Darüber hinaus ist gerade bei diesem Anwendungsbeispiel, das dazu noch den Vorteil hat, breiten Bevölkerungsschichten aus praktischer Erfahrung bekannt zu sein, besonders klar und einsichtig, daß bei gegebener Fahrstrecke die Fahrzeit die Fahrgeschwindigkeit determiniert und umgekehrt; bei gegebener Fahrstrecke (die kostentheoretisch der zu erzeugenden Produktmenge entspricht) ist also eine unabhängige Variation von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit nicht möglich. Die einander entsprechenden Variationen von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit sind vielmehr durch die Tatsache, daß die Fahrstrecke stets das Produkt aus Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit ist, technisch eindeutig determiniert. Trotzdem kann man jedoch durch die Betrachtung alternativer Fahrstrecken alle in der Kostentheorie mit Bezug auf die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung relevanten Sachverhalte am Beispiel des Kraftfahrzeugs in nahezu idealer Weise darstellen.

Das Beispiel des Kraftfahrzeugs hat darüberhinaus noch den großen Vorteil, daß die Beschaffung des die einzelnen Verbrauchsfunktionen definierenden Zahlenmaterials keine unlösbaren Schwierigkeiten bereitet.

Es ist zwar richtig, daß die für die statische Kostentheorie grundlegende Annahme von im Zeitverlauf konstanten Produktionsgeschwindigkeiten beim praktischen Betrieb von Kraftfahrzeugen in der Realität nur bedingt erfüllt ist; Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verkehrsbedingungen (z.B. Staus) und Straßenlage (z.B. enge Kurven) lassen ein Fahren mit konstanter Geschwindigkeit meist nicht zu. Dennoch sind Erkenntnisse, welche durch Vergleich der Kosten, die pro Zeiteinheit beim Fahren mit alternativen Geschwindigkeiten entstehen, sehr aufschlußreich für den praktischen Fahrbetrieb. Außerdem ist es so, daß in Produktionsbetrieben eine im Zeitverlauf konstante Produktionsgeschwindigkeit sehr viel häufiger anzutreffen ist als eine konstante Fahrgeschwindigkeit im Stra-

Benverkehr, so daß unter diesem Gesichtspunkt die Übertragung der für alternative, im Zeitverlauf konstante Geschwindigkeiten aus dem Kraftfahrzeug-Beispiel gewonnenen Erkenntnisse auf die betriebliche Produktion erleichtert wird.

Das Kraftfahrzeug-Beispiel ist auch hervorragend geeignet, das Ausmaß offenzulegen, in dem die Preisrelationen zwischen den eingesetzten Faktoren die optimale (d.h. "stückkosten"-minimale) Produktionsgeschwindigkeit bestimmen. Dabei kann klar aufgezeigt werden, wie stark die optimale Fahrgeschwindigkeit vom Kraftstoffpreis einerseits und von der Lohnhöhe des Fahrers andererseits abhängig ist, und in welchem Umfang dann, wenn z.B. der Lohn des Fahrers relativ stärker steigt als der Kraftstoffpreis, menschliche Arbeit durch Einsatz von zusätzlichem Kraftstoff (auf dem Weg über höhere Fahrgeschwindigkeit) substituiert wird.

Kapitel 2: Theoretische Grundlagen

Um die Herstellung von Verbindungen zur betriebswirtschaftlichen Kostentheorie zu erleichtern, sei zunächst folgendes festgehalten:

Die folgende Untersuchung basiert auf den Annahmen einer statischen Kostentheorie. Es wird also mit alternativen, im Zeitverlauf konstanten Geschwindigkeiten gearbeitet, wobei dies sowohl für die Produktions- als auch für die Kostengeschwindigkeit gilt. Ferner wird davon ausgegangen, daß die Faktorpreise und die Verbrauchsfunktionen der einzelnen Faktoren im Zeitverlauf konstant sind. Dadurch wird die Berücksichtigung alternativer Faktorpreise und unterschiedlicher Verbrauchsmengen, die von der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit abhängig sind, keineswegs ausgeschlossen. Es wird jedoch angenommen, daß die Verbrauchsmengen der Faktoren in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit eindeutig definiert sind, so daß z.B. Einflußgrößen wie das Anfahren mit kaltem Motor, Beschleunigen und Bremsen nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

Die Fahrgeschwindigkeit wird stets als Maßgröße der Intensität verwandt; eine Variation der Fahrgeschwindigkeit bedeutet also stets eine intensitätsmäßige Anpassung. Die Fahrzeit wird als Maßgröße der Leistungszeit¹⁾ verwandt; eine Variation der Fahrzeit bedeutet also stets eine zeitliche Anpassung.

1) Der technisch geschulte Leser wird um Nachsicht gebeten, wenn hier meist die übliche betriebswirtschaftliche Terminologie übernommen wird. Darin wird mit "Leistung" - leider - das bezeichnet, was im Sinne des technisch-physikalischen Maßsystemes "Arbeit" ist. Infolgedessen spricht man im Rahmen der betrieblichen Anpassungsprozesse nicht von Arbeitszeit, sondern von Leistungszeit, nicht von Leistung, sondern von Intensität bzw. Leistungsintensität (was dasselbe ist wie Produktionsgeschwindigkeit).

I. Die Kostenentwicklung bei zeitlicher Anpassung

Zeitliche Anpassung liegt dann vor, wenn unterschiedliche Produktmengen bei Konstanz der Produktionsgeschwindigkeit durch Variation der Leistungszeit erstellt werden. Die Leistungszeit ist dabei entweder durch den Quotienten aus Produktmenge und Produktionsgeschwindigkeit definiert oder sie definiert ihrerseits die Produktionsgeschwindigkeit als den Quotienten aus Produktmenge und Leistungszeit.

Der Verlauf der Gesamtkostenkurve bei zeitlicher Anpassung ist sehr stark davon abhängig, ob Kosten auftreten, die zwar von der Leistungszeit oder von der Leistungsintensität, jedoch nicht von beiden gleichzeitig abhängig sind¹⁾. Wenn derartige Kosten nicht auftreten, ergibt sich für die Gesamtkostenkurve in Abhängigkeit von der Leistungszeit der üblicherweise angenommene, in Abb. 2 dargestellte Zusammenhang. Die Gesamtkostenkurve verläuft in diesem Fall also grundsätzlich linear und genügt der Funktion

$$(2.1) \quad K(\bar{x}, t) = K_c + K_v(\bar{x}) \cdot t$$

Dabei wird mit \bar{x} die vorgegebene Produktionsgeschwindigkeit bezeichnet.

$K(\bar{x}, t)$ bezeichnet die Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Leistungszeit t und der vorgegebenen Produktionsgeschwindigkeit \bar{x} ,

K_c sind die (kalenderzeitproportionalen) fixen Kosten,

¹⁾ Typisch hierfür sind z.B. Kosten, welche wegen der Zahlung von Zeitlöhnen, garantierten Mindestlöhnen, Überstundenzuschlägen zu Zeitlöhnen usw. entstehen. Diese Kosten werden erst weiter unten auf S. 20 ff. in die Analyse einbezogen. Für ihre grundlegende Behandlung vgl. L. Pack, Die Elastizität der Kosten, Grundlagen einer entscheidungsorientierten Kostentheorie, Wiesbaden 1966, S. 198 ff.

$K_V(\bar{x})$ bezeichnet die variablen Gesamtkosten pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der (in diesem Fall fix vorgegebenen, deshalb der Querstrich) Leistungsintensität \bar{x} .

M ist die Produktmenge, die gleich dem Produkt aus Leistungsintensität und Leistungszeit ist, für die also gilt:

$$M = \bar{x} \cdot t.$$

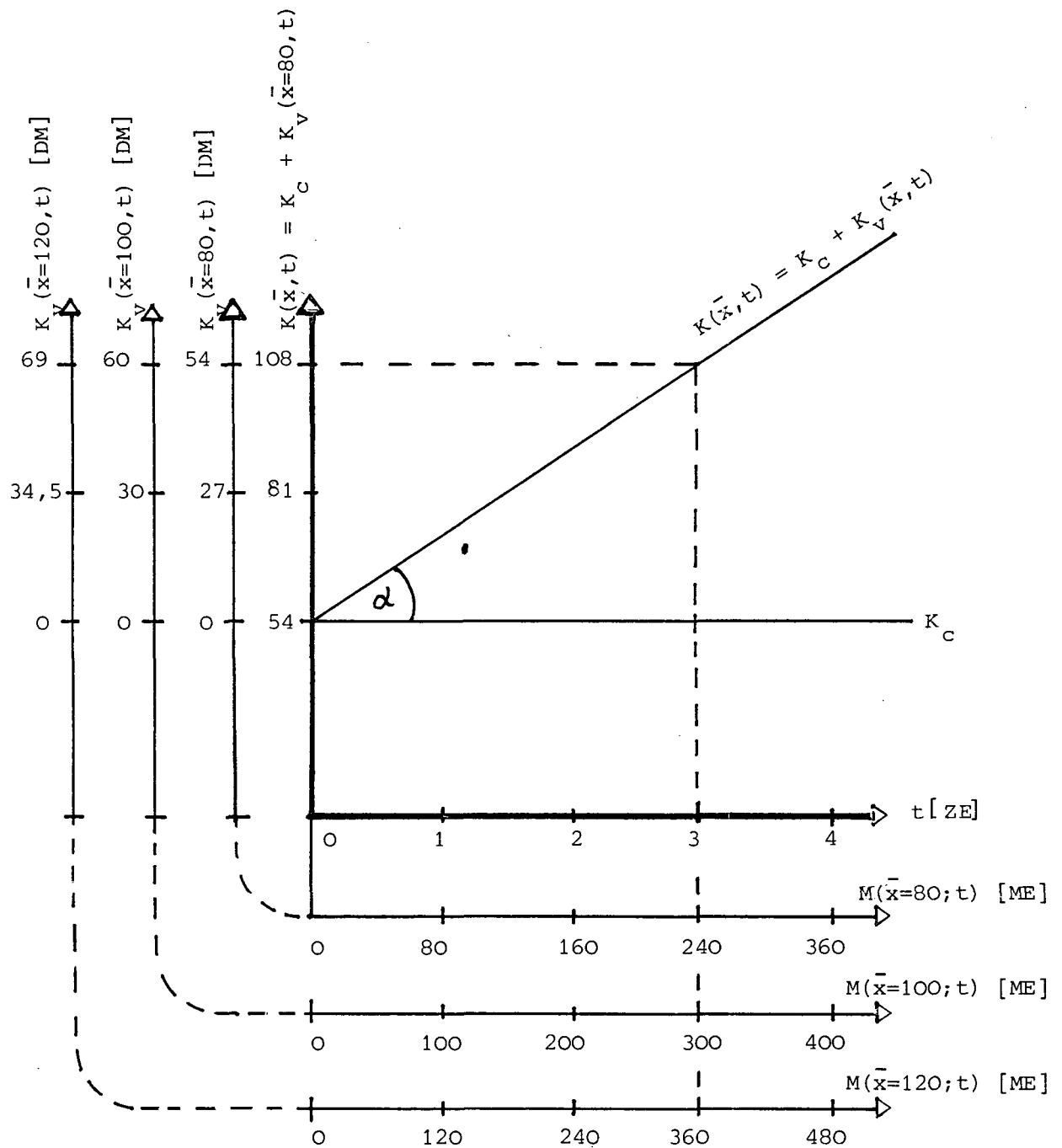


Abb. 1: Die Abhängigkeit der Kosten von der Leistungszeit bei alternativ vorgegebenen Leistungsintensitäten, wobei $K_V(x) = \text{tg } \alpha$.

II. Die Kostenentwicklung bei intensitätsmäßiger Anpassung

Wenn entsprechend dem Begriff der intensitätsmäßigen Anpassung unterschiedliche Produktmengen (bzw. Fahrstrecken) in einer vorgegebenen, gleichen Zeit mit unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten (bzw. Fahrgeschwindigkeiten) erstellt (bzw. zurückgelegt) werden, dann ergibt sich häufig für die Abhängigkeit der verbrauchten Faktormengen einerseits und der daraus resultierenden Faktorkosten der betreffenden Faktorarten andererseits das in Abb. 2 wiedergegebene typische Bild.

Die Leistungsintensität ist dabei entweder durch den Quotienten aus Produktmenge und Leistungszeit definiert, oder sie definiert ihrerseits die Leistungszeit als Quotient aus Produktmenge und Leistungsintensität.

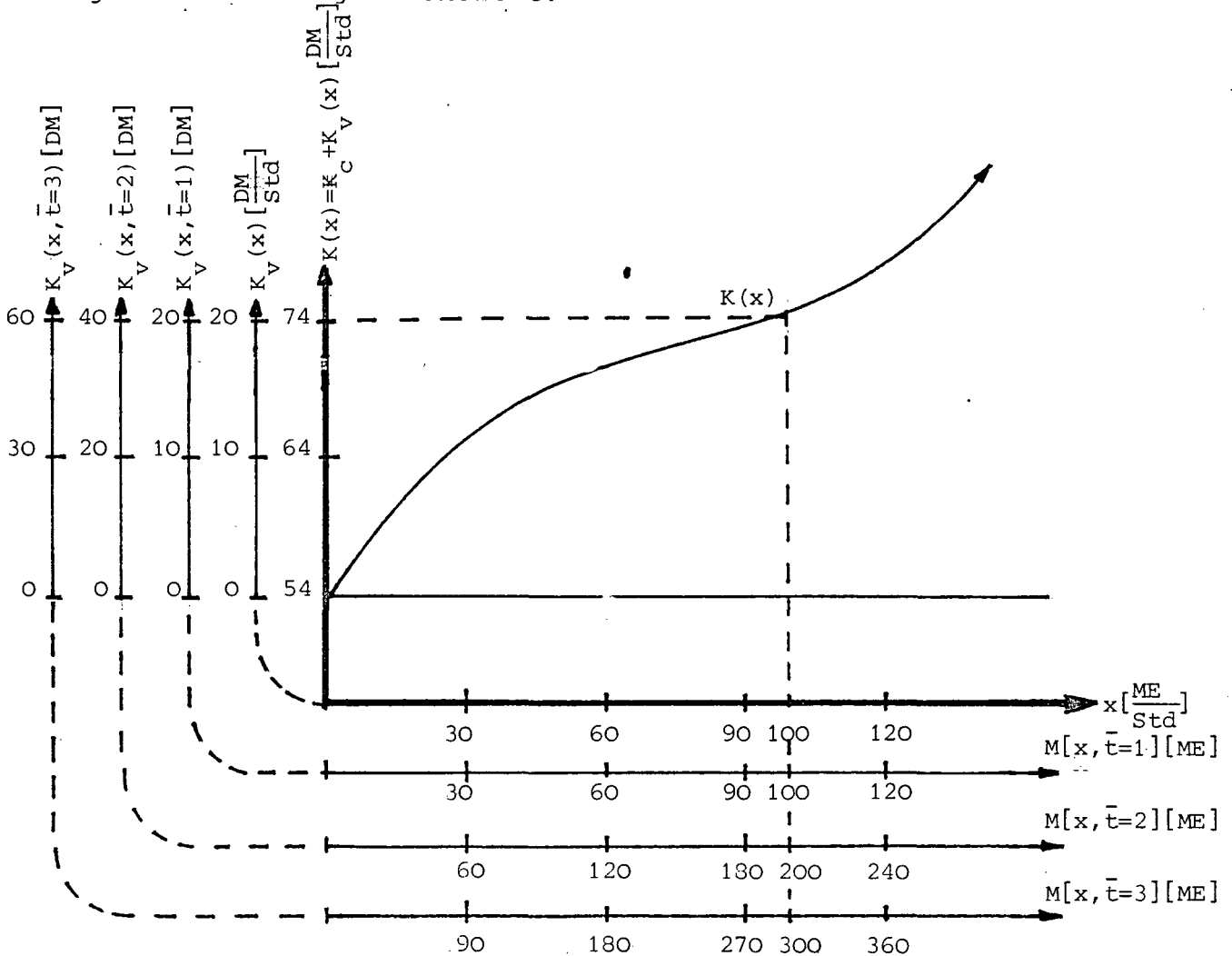


Abb. 2: Abhängigkeit des Faktorverbrauchs und der Faktorkosten von der Leistungsintensität x und der Produktmenge M bei alternativ vorgegebenen Leistungszeiten \bar{t}

Der Deutlichkeit halber sei darauf verwiesen, daß in Abb. 3 an beiden Achsen Geschwindigkeitsgrößen stehen: an der Abszisse die Produktionsgeschwindigkeit mit der Dimension "Mengeinheiten pro Zeiteinheit" (im Kfz-Beispiel km/Std.) und an der Ordinate die Kostengeschwindigkeit mit der Dimension "D-Mark pro Zeiteinheit". Da die Faktorpreise in diesem Abschnitt als konstant angenommen werden, ist die Kostengeschwindigkeit gleich dem Produkt aus der Verbrauchsgeschwindigkeit und dem Faktorpreis, also proportional zur Verbrauchsgeschwindigkeit, wobei der Faktorpreis (mit der Dimension DM pro Faktoreinheit) die Proportionalitätskonstante ist.

Die Verbrauchs- und die Kostengeschwindigkeit sind in Abhängigkeit von der Produktionsgeschwindigkeit grundsätzlich technisch definiert, und zwar durch die Verbrauchsfunktionen der einzelnen Faktoren.

An den Parallelen zu den Achsen stehen absolute Größen, und zwar parallel zur Abszisse Produktmengen $M = x \cdot t$ und an den Parallelen zur Ordinate (mit Ausnahme der ersten) Kosten in Höhe von $K_v(x) \cdot t$ D-Mark.

In der statischen Kostentheorie (die diesen Ausführungen zugrunde gelegt wird) gibt die Gesamtkostenkurve bei intensitätsmäßiger Anpassung an, welche Kosten pro Zeiteinheit anfallen, wenn in der vorgegebenen Produktionszeit unterschiedliche Produktmengen mit den für ihre Erstellung erforderlichen Produktionsgeschwindigkeiten hergestellt werden. Daraus ergibt sich eine wichtige Konsequenz für das theoretische und empirische Arbeiten mit den Grenzkosten der statischen Kostentheorie: sie geben an, um wieviel die Kosten pro Zeiteinheit für die Produktionsgeschwindigkeit $x + 1$ höher sind als für die Produktionsgeschwindigkeit x . In den Grenzkosten der statischen Kostentheorie sind also diejenigen Kosten nicht enthalten, welche durch die Steigerung (Beschleunigung) oder durch die Verringerung (Bremsen) der Produktionsgeschwindigkeit verursacht werden; die Grenzkosten enthalten also keine Kosten, welche durch die Veränderung der Produktionsgeschwindigkeit verursacht werden.

III. Die Kostenentwicklung bei optimaler Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung

Wenn ein Betrieb die Möglichkeit hat, eine Produktmenge mit (streng genommen unendlich vielen) alternativen Kombinationen von Produktionsgeschwindigkeit und Produktionszeit zu erstellen, dann wird er versuchen, diejenige Kombination zu wählen, die zu minimalen Kosten führt. In diesem Fall ergibt sich gewissermaßen eine Minimalkostenkombination höherer Ordnung. Bereits die Faktorkosten in Abhängigkeit von der Produktionsgeschwindigkeit sind nämlich ihrerseits nur dann eindeutig definiert, wenn jede Produktionsgeschwindigkeit mit der für sie geltenden Minimalkostenkombination realisiert wird.

Die Bestimmung der bei vorgegebener Produktmenge kostenminimalen Produktionsgeschwindigkeit kann wie folgt vorgenommen werden:

Bezeichnet man die zu erstellende Produktmenge mit M , so kann sie in dem hier interessierenden Zusammenhang in der Regel (für Kraftfahrzeuge immer) durch die Funktion

$$(2.2) \quad M = x \cdot t$$

beschrieben werden. Für die Kosten in Abhängigkeit von der Produktionsgeschwindigkeit gilt die Funktion

$$(2.3) \quad \tilde{K}(x) = K_C + K_V(x)$$

$K_V(x)$ bezeichnet dabei bekanntlich die variablen Kosten pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Leistungsintensität x . Die Kosten einer vorgegebenen Produktmenge \bar{M} betragen dann

$$(2.4) \quad K(x, \bar{M}) = K_C + K_V(x) \cdot t \quad | \quad \bar{M} = x \cdot t$$

Weil $M = x \cdot t$ gilt, können x und t bei gegebenem M jedoch nicht gleichzeitig variiert werden; deshalb wird t in (2.4) durch den Ausdruck

$$t = \frac{\bar{M}}{x}$$

ersetzt.

Differenziert man die dann sich ergebende Kostenfunktion nach x , erhält man

$$\frac{dK}{dx} = \frac{K'_V(x) \cdot \bar{M} - K_V(x) \cdot \bar{M}}{x^2} = 0$$

Daraus folgt die bekannte Bedingung

$$(2.5) \quad K'_V(x) = K'(x) = \frac{K_V(x)}{x}$$

Verbal: kostenminimal bzw. optimal ist unter den hier geltenden Bedingungen diejenige Produktionsgeschwindigkeit, für welche die variablen Kosten pro Stück ein Minimum werden; denn

1. die erste Ableitung der gesamten variablen Kosten und die erste Ableitung der Gesamtkosten stimmen bekanntlich überein und sind gleich den Grenzkosten;

2. $\frac{K_V(x)}{x}$ bezeichnet nicht nur die variablen Kosten pro Einheit der Produktionsgeschwindigkeit, sondern auch die variablen Kosten pro Mengeneinheit, weil

$$\frac{K_V(x, M)}{M} = \frac{K_V(x) \cdot t}{x \cdot t} = \frac{K_V(x)}{x} ;$$

3. die variablen Stückkosten werden bekanntlich dann ein Minimum, wenn sie gleich den Grenzkosten sind.

Daß in obigem Optimierungskriterium die vorgegebene Produktmenge \bar{M} nicht vorkommt, bedeutet, daß das Optimierungskriterium von der Produktmenge \bar{M} unabhängig ist; (2.5) gilt also nicht nur für eine bestimmte Produktmenge, es trifft vielmehr für alle Produktmengen zu, für welche die Produktmengen- und die Kostenfunktion gelten, aus denen (2.5) abgeleitet ist. Daraus ergibt sich folgendes kostenoptimale Verhalten:

Will ein Betrieb, für den die Produktmengenfunktion $M = x \cdot t$ und die Kostenfunktion $\tilde{K}(x) = K_C + K_V(x)$ gelten, variierende

Produktmengen mit minimalen Kosten herstellen, dann muß er diejenige Produktionsgeschwindigkeit realisieren, für welche die variablen Kosten pro Stück (bzw. pro Einheit der Produktionsgeschwindigkeit) ein Minimum werden, und die Produktionszeit wählen, welche gleich dem Quotienten aus der Produktmenge und der genannten Produktionsgeschwindigkeit ist.

Auf das Kraftfahrzeug-Beispiel übertragen bedeutet dies (sofern die Straßenverhältnisse ein solches Verhalten zulassen): wer eine bestimmte Strecke kostenminimal zurücklegen will, muß die Fahrgeschwindigkeit wählen, für welche die variablen Kosten pro Kilometer ein Minimum werden, und zwar so lange bzw. so viel Zeiteinheiten lang, wie dem Quotienten aus Weg und Geschwindigkeit entspricht.

Die vorgenannte Regel bedarf nun allerdings noch einer Ergänzung. Was soll ein Betrieb tun, wenn $t = \frac{M}{x}$ größer ist als die maximal zulässige Produktionszeit, bzw. wenn die optimale Produktionsgeschwindigkeit größer ist als die maximale? Letzteres kann für Kraftfahrzeuge durchaus eintreten. In der Literatur ist bisher nur der erste Fall untersucht worden, und es wird empfohlen, die Produktionsgeschwindigkeit über die optimale Produktionsgeschwindigkeit hinaus zu steigern. Dabei muß während der gesamten maximal zulässigen Produktionszeit mit der Produktionsgeschwindigkeit gearbeitet werden, welche dem Quotienten aus der zu erzeugenden Produktmenge und der maximal zulässigen Produktionszeit entspricht. Der zweite Fall wird weiter unten zu behandeln sein.¹⁾

Zusammenfassend ergibt sich unter den genannten Bedingungen für den betrachteten Betrieb also folgende kostenoptimale Vorgehensweise bei steigenden Produktmengen:

¹⁾ vgl. S. 62

1. Produktmengen, welche kleiner oder höchstens gleich dem Produkt aus der optimalen Produktionsgeschwindigkeit und der maximal zulässigen Produktionszeit sind, werden in der Weise produziert, daß die optimale Produktionsgeschwindigkeit eingehalten und diejenige Produktionszeit gewählt wird, welche gleich dem Quotienten aus der zu erstellenden Produktmenge und der optimalen Produktionsgeschwindigkeit ist.
2. Produktmengen, die größer sind als das Produkt aus der dem Minimum der variablen Kosten pro Stück entsprechenden Produktionsgeschwindigkeit und der maximal zulässigen Produktionszeit t_{\max} , erstellt der Betrieb in der Weise, daß er die maximal zulässige Produktionszeit einhält und die Produktionsgeschwindigkeit $x = \frac{M}{t_{\max}}$ realisiert.

Die zuerst beschriebene Verhaltensweise ist zeitliche Anpassung, die zweite Verhaltensweise intensitätsmäßige Anpassung.

Eine graphische Darstellung der beschriebenen Zusammenhänge gibt die folgende Abbildung. Wie daraus zu ersehen ist, verläuft die Gesamtkostenkurve (unter den gemachten Annahmen notwendigerweise) bis zum Erreichen der maximal zulässigen Produktionszeit linear; die Grenzkosten sind in diesem Bereich konstant und gleich den variablen Kosten pro Zeiteinheit. Für Produktmengen, welche in der maximal zulässigen Produktionszeit mit der kostenoptimalen Produktionsgeschwindigkeit nicht mehr produzierbar sind, gilt ein gekrümmt ansteigender Verlauf der Gesamtkostenkurve.

Der im Bereich zeitlicher Anpassung gestrichelt gezeichnete Kurvenverlauf würde sich dort bei intensitätsmäßiger (statt zeitlicher) Anpassung ergeben; die dann entstehenden Kosten sind überall höher als bei zeitlicher Anpassung.

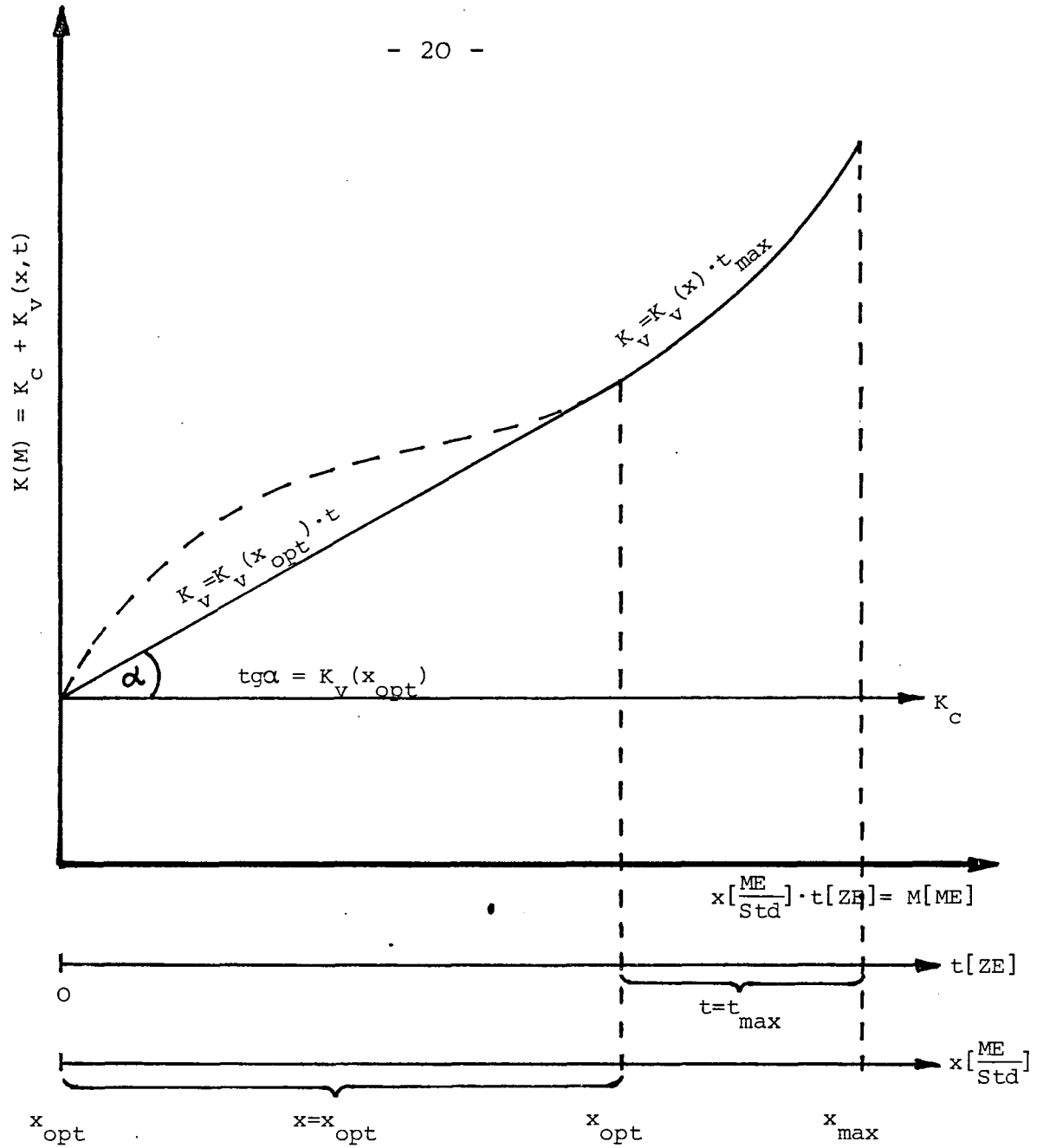


Abb. 3: Die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung bei steigender Produktmenge

Kapitel 3: Allgemeine Übertragung der theoretisch gewonnenen Erkenntnisse auf die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen im Zwei-Faktoren-Fall

Im vorliegenden Kapitel wird gezeigt, wie die im Kapitel 2 dargestellten theoretischen Erkenntnisse für die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen angewandt werden können. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge wird dabei im Abschnitt II ein vereinfachtes Zahlenbeispiel herangezogen. Berechnungen und Vergleiche auf der Basis von Kosten- und Verbrauchsfunktionen, welche für Kraftfahrzeuge gelten, die zur Zeit tatsächlich in der Bundesrepublik Deutschland hergestellt werden, erfolgen erst im Kapitel 4.

Die Analyse umfaßt hier zunächst nur zwei Faktoren, nämlich den Kraftstoffverbrauch und die Fahrzeit des Fahrers. Das bedeutet sicher eine wesentliche Einschränkung. Auf diese Weise wird es jedoch möglich, die relevanten Zusammenhänge wesentlich anschaulicher und infolgedessen einfacher darzustellen. Außerdem sei an dieser Stelle bereits vermerkt, daß die für den Zwei-Faktoren-Fall ableitbaren Ergebnisse sich nicht wesentlich ändern, wenn zusätzliche Faktoren in die Analyse einbezogen werden (vgl. die Ausführungen im Kapitel 6).

I. So geht es nicht

In Verbindung mit der zweiten Ölkrise erschien unter der Überschrift "Von einem der auszog, das (Kraftstoff-)Sparen zu lernen" ein Artikel, in dem versucht wurde, das "ideale Spar-Tempo" (abgekürzt IST) zu bestimmen.¹⁾

Die Bestimmung des IST soll danach wie folgt geschehen: Man geht von der Kurve aus, welche den spezifischen Kraftstoffverbrauch (in l/100 km) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit darstellt. Das ideale Spartempo IST liegt dann bei der Geschwindigkeit, für welche der Fahrstrahl aus dem Koordinatenursprung an die Kraftstoffverbrauchskurve zur Tangente wird (vgl. die folgende Abb. 4).

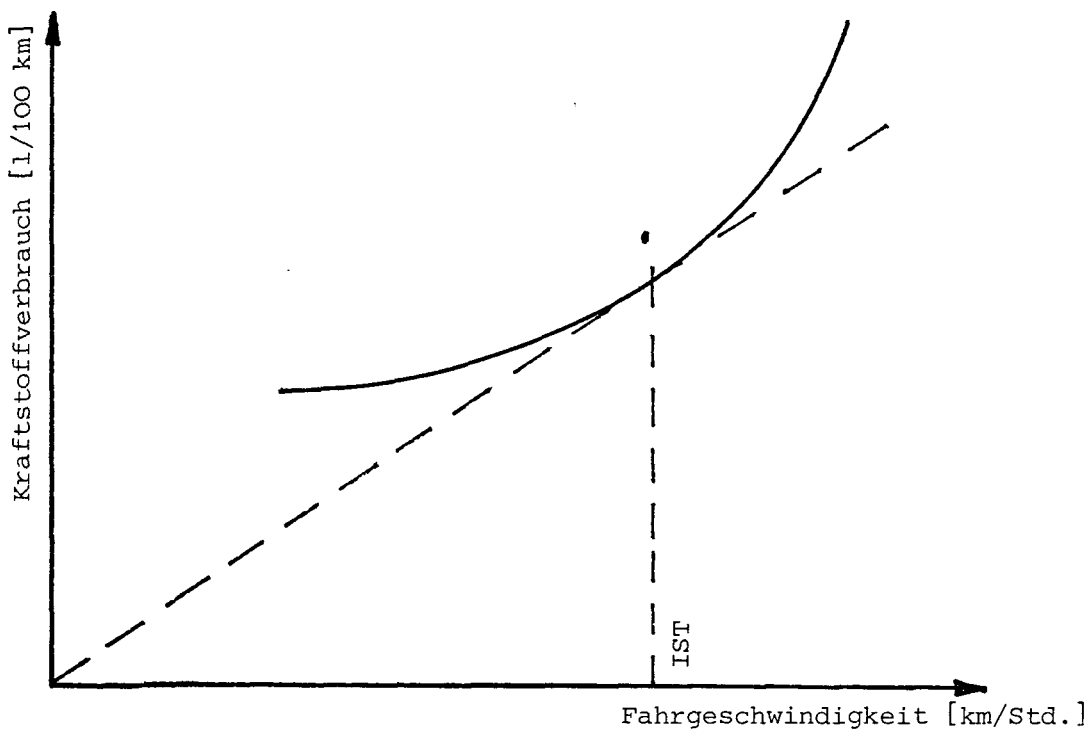


Abbildung 4:

Die Bestimmung des "idealen Spar-Tempos" (IST) nach Brezing²⁾

¹⁾ E. Brezing, Was ist "IST"? Von einem der auszog, das (Kraftstoff-)Sparen zu lernen, oder: Hauffs Märchen neunundsiebzig, Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22. August 1979, Nr. 194, S. 25

²⁾ ebenda

Daß man so zu keinem vernünftigen Ergebnis kommen kann, ersieht man schon daran, daß die auf diese Weise sich ergebende Größe (welche gleich dem Tangens des Fahrstrahlwinkels ist) folgende unsinnige Dimension hat:¹⁾

$$\frac{\text{Liter}}{100 \text{ km}} : \frac{\text{km}}{\text{Std.}} = \frac{\text{Liter} \cdot \text{Stunden}}{100 \text{ km}^2}$$

Brezing hat wohl richtig erkannt, daß man Benzinverbrauch und Fahrzeit miteinander verknüpfen muß, wenn man ein sinnvolles Ergebnis erhalten will. Würde er dabei vom Benzinverbrauch pro Stunde statt vom spezifischen Benzinverbrauch ausgehen, dann erhielte er wenigstens eine sinnvolle Dimension für sein Ergebnis, wenn auch das Ergebnis selbst, wie noch zu zeigen sein wird, immer noch nicht sinnvoll.würde.

1) Überträgt man ein derartiges Vorgehen auf die Produktions- und Kostentheorie, so entspricht es dem Versuch, die optimalen Kosten dadurch zu bestimmen, daß man die Produktionsgeschwindigkeit ermittelt, für welche der Fahrstrahl an die Kurve der variablen Kosten pro Stück zur Tangente wird.

II. Die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Zwei-Faktoren-Modell

1. Die benötigten Grundbegriffe und ihre Symbole

Zur Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit benötigt man zunächst die variablen Kosten pro Zeiteinheit, im vorausgehenden Kapitel allgemein mit $K_v(x)$ bezeichnet. Zu ihrer Bestimmung ist von folgenden Größen auszugehen:

x [$\frac{\text{km}}{\text{Std}}$] = Fahrgeschwindigkeit in Kilometer pro Stunde

M [km] = zu fahrende Strecke in Kilometer

π_1 [$\frac{\text{DM}}{\text{l}}$] = Kraftstoffpreis in D-Mark pro Liter

$r_1(x)$ [$\frac{1}{100 \text{ km}}$] = spezifischer Kraftstoffverbrauch¹⁾

Daraus folgen:

$$R_1(x) \left[\frac{1}{\text{Std}} \right] = \frac{r_1(x)}{100} \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] = \frac{r_1(x) \cdot x}{100} \left[\frac{1}{\text{Std}} \right]$$

= Verbrauchsgeschwindigkeit des Kraftstoffes²⁾

1) Um Mißverständnisse auszuschließen, sei darauf verwiesen, daß es sich hier um den spezifischen Kraftstoffverbrauch eines Motors in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit handelt, wobei der Motor im höchsten Gang das Fahrzeug auf ebener Strecke mit konstanter Geschwindigkeit, also im Teillastbereich bewegt; dabei wirkt sich aus, daß der Luftwiderstand eines Fahrzeugs mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Es handelt sich also nicht um den spezifischen Kraftstoffverbrauch eines im Stand laufenden Motors, für den bei jeder Drehzahl von der zugehörigen Höchstleistung ausgegangen wird (vgl. dazu L. Pack, Die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 584, Abb. 14).

2) Im Rahmen der hier vorgenommenen statischen Betrachtung wird angenommen, daß die Fahrgeschwindigkeit während der Fahrzeit konstant ist. Ferner gilt:

$$r_1(x) \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right] = \frac{r_1(x)}{100} \left[\frac{1}{\text{km}} \right]$$

d.h. der pro gefahrenen Kilometer verbrauchte Kraftstoff ist $\frac{1}{100}$ des pro 100 km verbrauchten Kraftstoffes. Diese Umrechnung ist notwendig, weil der spezifische Kraftstoffverbrauch $r_1(x)$ üblicherweise in "Liter pro 100 km" angegeben wird.

$$K_1[R_1(x)] \left[\frac{DM}{Std} \right] = \pi_1 \left[\frac{DM}{l} \right] \cdot R_1(x) \left[\frac{1}{Std} \right] = \pi_1 \cdot R_1(x) \left[\frac{DM}{Std} \right]$$

= die aus der Verbrauchsgeschwindigkeit des Kraftstoffs resultierende Kostengeschwindigkeit des Faktors Kraftstoff.

Bezüglich des Verbrauchs an Faktor 2, d.h. an menschlicher Arbeit durch die Fahrzeit des Fahrers, ist zwischen Zeitlohn und Akkordlohn zu trennen. Der Zeitlohn bringt dabei einige bisher nicht behandelte Probleme, da er eine der auf S. 111 ausgeklammerten Kostenarten ist.

Will man im Falle des Zeitlohnes volle Analogie zu den zuvor für die Behandlung von Faktor 1 gegebenen Definitionen erreichen, dann wird die Darstellung etwas umfangreicher als dies für die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit eigentlich notwendig ist. Da jedoch die Produktionsverhältnisse nicht immer so einfach sind, sei zur Offenlegung der Zusammenhänge dennoch streng analog vorgegangen. Dazu seien definiert:

$$\pi_2 \left[\frac{DM}{Std} \right] = \text{Lohnsatz des Fahrers bei Zeitlohn (Stundenlohn)}$$

$$r_2(x) \left[\frac{Std}{km} \right] = \text{spezifische Fahrzeit} = \text{Fahrzeit pro Kilometer}$$

$$t(M, x) [Std] = \text{Fahrzeit (in Stunden) in Abhängigkeit von der Fahrstrecke } M \text{ und der Fahrgeschwindigkeit } x$$

Dabei ist zu beachten, daß wegen $M[km] = x \left[\frac{km}{Std} \right] \cdot t[Std]$ die Beziehungen gelten:

$$x = \frac{M}{t} \left[\frac{km}{Std} \right] \text{ und } t = \frac{M}{x} [Std] : x \left[\frac{km}{Std} \right] = \frac{M}{x} [Std]$$

Ferner muß für $r_2(x)$ als Quotient aus Fahrzeit und Fahrstrecke M gelten:

$$r_2(x) \left[\frac{Std}{km} \right] = \frac{M}{x} [Std] : M[km] = \frac{1}{x} \left[\frac{Std}{km} \right]$$

Daraus folgt, daß auch gelten muß:

$$x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] = \frac{1}{r_2(x)} \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right]$$

Für $R_2(x)$ als das Produkt aus der spezifischen Fahrzeit $r_2(x)$ und der Fahrgeschwindigkeit x , muß (analog zu dem Zusammenhang zwischen $r_1(x)$ und $R_1(x)$) für ein Kraftfahrzeug gelten:

$$\begin{aligned} R_2(x) &= r_2(x) \left[\frac{\text{Std}}{\text{km}} \right] \cdot x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] = r_2(x) \cdot x \text{ [ohne Dimension]} \\ &= r_2(x) \cdot \frac{1}{r_2(x)} = 1 \text{ [ohne Dimension]} \end{aligned}$$

Dementsprechend gilt für $K_2[R_2(x)]$ (entsprechend der Konzeption des Zeitlohnes) unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit x :

$$K_2[R_2(x)] = R_2(x) \cdot \pi_2 = \pi_2 \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right]$$

Damit ist die - hier unnötige - Ableitung von K_2 durchgeführt. Unnötig ist sie, weil bei Zeitlohn der Lohnsatz π_2 bereits mit der Dimension $\frac{\text{DM}}{\text{Std}}$ als Kostengeschwindigkeit vorgegeben ist, und es deshalb der für den Kraftstoffverbrauch erforderlichen Umrechnung nicht bedarf.

Wenn Akkordlohn gezahlt wird, ist zwischen Stückakkord und Stückzeitakkord zu trennen¹⁾.

Bei Stückakkord wird unabhängig vom Zeitverbrauch (und der gefahrenen Geschwindigkeit) pro gefahrenen Kilometer ein bestimmter Betrag gezahlt; er sei

$$\pi_{2A} \left[\frac{\text{DM}}{\text{km}} \right] = \text{Lohnsatz pro gefahrenen Kilometer, wenn Akkordlohn in Form des Stückakkords gezahlt wird.}$$

¹⁾ Vgl. hierzu E. Voß, Industriebetriebslehre für Ingenieure, 3. Aufl., München/Wien 1976, S. 133.

Im Falle des Stückakkordes erhält man deshalb für die durch den Verbrauch an menschlicher Arbeit verursachte Kostengeschwindigkeit:

$$K_{2A}(x) = \pi_{2A} \left[\frac{\text{DM}}{\text{km}} \right] \cdot x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] = \pi_{2A} \cdot x \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right]$$

Beim Stückzeitakkord wird pro gefahrenen Kilometer eine bestimmte Zeitvorgabe vergütet, und zwar unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit x und deshalb auch unabhängig von der tatsächlich für einen Kilometer verbrauchten Fahrzeit; diese Zeitvorgabe sei:

$$r_{2Z} \left[\frac{\text{Std}}{\text{km}} \right] = \text{Akkordzeitvorgabe pro gefahrenen Kilometer bei Stückzeitakkord.}$$

Daneben bedarf es im Falle des Stückzeitakkordes noch eines Lohnsatzes (meist Minutenfaktor genannt, hier der Einfachheit halber auf 1 Stunde bezogen); er sei:

$$\pi_{2Z} \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right] = \text{Lohnsatz des Fahrers, wenn Stückzeitakkord gezahlt wird,}$$

und ist in der Regel etwas höher als π_{2A} , weil man davon ausgeht, daß von einem Akkordarbeiter generell eine etwas höhere Leistung erbracht wird, als von einem Arbeiter, dem Zeitlohn gezahlt wird.

Von r_{2Z} ausgehend, erhält man bei Stückzeitakkord für den pro Stunde zu bezahlenden Verbrauch an menschlicher Arbeit (Verbrauchsgeschwindigkeit):

$$R_{2Z}(x) = r_{2Z} \left[\frac{\text{Std}}{\text{km}} \right] \cdot x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] = r_{2Z} \cdot x \left[\frac{\text{zu bezahlende Stunden}}{\text{verbrauchte Stunde}} \right]$$

Im Unterschied zum Zeitlohn stimmen also beim Stückzeitakkord die verbrauchte und die zu bezahlende Zeit meist nicht überein; der Wert von $R_{2Z}(x)$ liegt in der Realität meist über 1 und zwar zwischen 1 und $1 \frac{1}{3}$.

Aus $R_{2Z}(x)$ und π_{2Z} folgt:

$$K_{2Z}(x) = R_{2Z}\left[\frac{Std}{Std}\right] \cdot \pi_{2Z}\left[\frac{DM}{Std}\right] = r_{2Z} \cdot \pi_{2Z} \cdot x\left[\frac{DM}{Std}\right]$$

= die bei Stückzeitakkord aus dem Verbrauch an menschlicher Arbeit resultierende Kostengeschwindigkeit.

Aus dem Einsatz aller variablen Faktoren zusammen ergibt sich:

$$K(x) = \sum_{i=1}^n K_i(x) = \text{die durch den Einsatz aller an einer Faktorkombination beteiligten Faktoren verursachte Gesamtkostengeschwindigkeit.}$$

Schließlich werden für die folgende Untersuchung noch benötigt:

$C_i[M(x,t)][DM]$ = die Kosten des Faktors i , welche durch das Zurücklegen einer Strecke von M Kilometern verursacht werden

$C[M(x,t)] = \sum_{i=1}^n C_i[M(x,t)][DM]$ = die durch alle Faktoren zusammen beim Zurücklegen der Strecke M verursachten Kosten

Bezüglich der Funktionen $C[M(x,t)]$ und $C_i[M(x,t)]$ ist noch darauf zu verweisen, daß wegen $M = x \cdot t$ stets nur zwei der Größen M , x und t unabhängig sind; die dritte Größe ist durch die beiden anderen Größen eindeutig definiert. Daraus folgt, daß die Funktion, welche C_i definiert (für C gilt natürlich dasselbe), in drei Formen auftreten kann, und zwar entweder:

$C_i(M, x)$, wobei für t dann gilt $t = \frac{M}{x}$, oder

$C_i(M, t)$, wobei für x dann gilt $x = \frac{M}{t}$, oder

$C_i(x, t)$, wobei für M dann gilt $M = x \cdot t$.

2. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Zwei-Faktoren-Fall, wenn Zeitlohn gezahlt wird

Zur Vereinfachung wird die Untersuchung zunächst auf zwei entscheidungsrelevante Faktoren begrenzt¹⁾, so daß n gleich 2 ist, wobei für n bei Zeitlohn 2, bei Stückakkord 2A und bei Stückzeitakkord 2Z zu setzen ist. Der Fall des Zeitlohns wird zuerst behandelt. Stückakkord und Stückzeitakkord werden erst unter 3. dargestellt.

Die absolute Höhe der durch den Verbrauch von Faktor 1 entstehenden Kosten (mit der Dimension DM) beträgt in Abhängigkeit von der Fahrstrecke M und der Fahrgeschwindigkeit x :

$$\begin{aligned}(1) \quad C_1[M(x,t)] &= \pi_1 \cdot R_1(x) \cdot t = \pi_1 \cdot R_1(x) \cdot \frac{M}{x} \\ &= \pi_1 \left[\frac{\text{DM}}{1} \right] \cdot \frac{r_1(x)}{100} \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot M[\text{km}] = \frac{\pi_1 \cdot r_1(x)}{100} \cdot M[\text{DM}]\end{aligned}$$

Anstelle der absoluten Kosten kann man, wie noch zu zeigen sein wird, auch die Kosten pro Zeiteinheit $K_1[R_1(x)]$ den folgenden Berechnungen zugrunde legen; für sie gilt

$K_1[R_1(x)] = C_1[M(x,t)] : t$, so daß man erhält:

$$(2) \quad K_1[R_1(x)] = \frac{\pi_1 \cdot r_1(x)}{100} \cdot \frac{M}{t} = \pi_1 \cdot \frac{r_1(x) \cdot x}{100} \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right]$$

Bezüglich des Verbrauchs an Faktor 2 ist, wie zuvor bereits dargelegt, zu beachten, daß $R_2(x)$, wenn es wie hier den üblicherweise in (Arbeits-)Stunden gemessenen Verbrauch an menschlicher Arbeit angibt, bei Zeitlohn stets gleich 1 und dimensionslos ist, denn die Dimension "Stunde pro Stunde" ergibt 1. Deshalb gilt:

$\pi_2 \cdot R_2(x) = \pi_2$ und man erhält für die absolute Höhe der Kosten an menschlicher Arbeit in Abhängigkeit von der Fahrstrecke M und der Fahrgeschwindigkeit x

¹⁾ Weitere Faktoren werden auf S. 94 ff. einbezogen.

$$(3) C_2[M(x,t)] = \pi_2 \left[\frac{DM}{Std} \right] \cdot t[Std] = \pi_2 \cdot \frac{M}{x} [DM]$$

Auch bezüglich dieses Faktors kann man stattdessen mit den Kosten pro Zeiteinheit $K_2 \left[\frac{DM}{Std} \right]$ arbeiten; für sie gilt:

$$(4) K_2[R_2(x)] = C_2[M(x,t)] : t = \pi_2 \left[\frac{DM}{Std} \right]$$

Für die Durchführung der Optimierungsrechnung können entweder die Funktionen (1) und (3) oder (2) und (4) miteinander kombiniert werden; das Ergebnis ist dasselbe.

Da der von (2) und (4) ausgehende Weg weiter oben bei der allgemeinen Ermittlung der optimalen Kombination von intensitätsmäßiger und zeitlicher Anpassung bereits beschrieben worden ist, werden im folgenden (1) und (3) miteinander kombiniert. Dann erhält man für die gesamten entscheidungsrelevanten Kosten C_e , welche das Zurücklegen der Fahrstrecke M verursacht:

$$(5) C_e[M(x,t)] = \sum_{i=1}^n C_i \cdot [M(x,t)]$$

Daraus folgt im Zwei-Faktoren-Fall, wenn M und x als unabhängige Variable gewählt und nur zwei Faktoren berücksichtigt werden:

$$C_e^2(M,x) = \frac{\pi_1 \cdot r_1(x)}{100} \cdot M + \pi_2 \cdot \frac{M}{x} \left[\frac{DM}{Std} \right]$$

Beachtet man nun, daß der spezifische Kraftstoffverbrauch für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor üblicherweise durch eine quadratische Funktion der Form

$$r_1(x) = ax^2 + bx + c \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$$

ausgedrückt werden kann, erhält man¹⁾:

$$(6) C_e^2(M,x) = \frac{\pi_1}{100} \cdot (ax^2 + bx + c) \cdot M + \pi_2 \cdot \frac{M}{x} \left[\frac{DM}{Std} \right]$$

Da diese Funktion in der Realität stets konvex, und da M als vorgegebene Größe konstant ist, braucht man sie zur Bestimmung

¹⁾ Im Sinne der Kostentheorie definiert (6) die Kosten über der Isoquante für die Fahrstrecke M in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit x und der Fahrzeit $t = \frac{M}{x}$. Vgl. hierzu L. Pack, die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 230, v.a. \bar{x} Abb. 46.

ihres Minimums nur nach x zu differenzieren und den Differentialquotienten gleich Null zu setzen:

$$\frac{dC_e^2}{dx} = \left[\frac{\pi_1}{100} \cdot (2ax + b) - \frac{\pi_2}{x^2} \right] \cdot M = 0$$

Daraus folgt als Optimierungskriterium¹⁾:

$$(7) \frac{2ax^3 + bx^2}{100} = \frac{\pi_2}{\pi_1}$$

Aus (7) kann die optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} bestimmt werden.

3. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Zwei-Faktoren-Fall, wenn Akkordlohn gezahlt wird

a) Die Situation bei Zahlung von Stückakkord

Hat der Akkordlohn die Form des Stückakkords, d.h. wird pro gefahrenen Kilometer ein bestimmter Betrag $\pi_{2A} \left[\frac{DM}{km} \right]$ gezahlt, erhält man anstelle von (3):

$$(8) C_{2A} [M(x, t)] = \pi_{2A} \left[\frac{DM}{km} \right] \cdot x \left[\frac{km}{Std} \right] \cdot t [Std]$$

Wählt man M und x als unabhängige Variable, folgt daraus

$$C_{2A} (M, x) = \pi_{2A} \cdot x \cdot \frac{M}{x} [DM] = \pi_{2A} \cdot M [DM]$$

Auch in diesem Fall kann man stattdessen mit der Kostengeschwindigkeit arbeiten; für sie gilt anstelle von (4):

$$(9) K_{2A} [R_{2A}(x)] = C_{2A} [M(x, t)] : t = \pi_{2A} \cdot M \cdot \frac{M}{x} = \pi_{2A} \cdot x \left[\frac{DM}{Std} \right]$$

1) Kriterium (7) hätte man natürlich auch nach der Regel bestimmen können, daß für (6) die optimale Geschwindigkeit diejenige ist, für die

$K_v(x, M) = \frac{v}{x}$ ist; vgl. weiter oben, S. 17 ff. Das hätte der Kombination von (2) und (4) entsprochen.

Es sei noch kurz gezeigt, wozu das eingangs erwähnte IST von Brezing führt. Seinem Vorgehen gemäß bestimmt er $r_1'(x) = \frac{1}{x}$, was die Gleichung $2ax + b = ax + b + \frac{c}{x}$ ergibt, aus der als Kriterium folgt:

$$x_{opt} = \sqrt{\frac{c}{a}}$$

also eine nicht nur von M, sondern von beiden Faktorpreisen unbeeinflusste optimale Fahrgeschwindigkeit.

Die Kombination der Gleichungen (1) und (8) führt anstelle von (6) zu:

$$(10) C_e^2(M, x) = \frac{\pi_1}{100} \cdot (ax^2 + bx + c) \cdot M + \pi_{2A} \cdot M$$

Differenziert man zur Bestimmung des Optimums diese Funktion nach x und setzt den Differentialquotienten gleich Null, erhält man:

$$\frac{dC_e^2}{dx} = \frac{\pi_1}{100} \cdot (2ax + b) \cdot M = 0$$

Daraus folgt:

$$\frac{\pi_1}{100} \cdot 2ax \cdot M = - \frac{\pi_1}{100} \cdot b \cdot M,$$

was anstelle von (7) zu dem Kriterium

$$(11) x_{\text{opt}} = - \frac{b}{2a}$$

führt. Dieses Kriterium ist aus der statischen Kostentheorie wohl- bekannt und bestimmt das Minimum der variablen Kosten pro Stück, wenn die variablen Gesamtkosten durch die Funktion

$$K_v(x) = ax^3 + bx^2 + cx$$

definiert sind. Überraschend ist dabei, daß Kriterium (11) nicht nur von M , sondern auch von π_1 und von π_2 unabhängig ist, während Kriterium (7) nur von M unabhängig ist. Dies ergibt sich daraus, daß π_{2A} pro gefahrenen Kilometer konstant und infolgedessen auf die optimale Fahrgeschwindigkeit ohne Einfluß ist, so daß das Optimum nur durch die Kosten des Kraftstoffverbrauchs bestimmt wird. Diese sind ihrerseits proportional zum Kraftstoffverbrauch, mit π_1 als Proportionalitätskonstante. Folglich hat auch π_1 bei Stückakkord auf die optimale Fahrgeschwindigkeit keinen Einfluß, und dieselbe ist im Rahmen des hier benutzten Modells bei Akkordlohn durch das Minimum der Kurve des spezifischen Kraftstoffverbrauchs definiert (vgl. dazu auch Abb. 5 weiter unten). Die diesem Minimum entsprechende Fahrgeschwindigkeit und die ihr zugeordnete

Motordrehzahl können jedoch nicht auf Dauer realisiert werden, ohne daß der Motorverschleiß zu groß wird¹⁾.

b) Die Situation bei Zahlung von Stückzeitakkord

Im Fall des Stückzeitakkords erhält man anstelle von (3) bzw. (8):

$$\begin{aligned}(12) \quad C_{2Z} [M(x, t)] &= r_{2Z} \left[\frac{\text{Std}}{\text{km}} \right] \cdot x \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right] \cdot \pi_{2Z} \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right] \cdot t [\text{Std}] \\ &= r_{2Z} \cdot x \cdot \pi_{2Z} \cdot \frac{M}{x} [\text{DM}] \\ &= r_{2Z} \cdot \pi_{2Z} \cdot M [\text{DM}]\end{aligned}$$

Kombiniert man dies mit (1), erhält man in Analogie zum Fall des Stückakkords ebenfalls (11) als Optimierungskriterium.

¹⁾ Vgl. hierzu L. Pack, Die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 583 und S. 589-592; R. Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 15. Aufl., Düsseldorf 1961, S. 248.

4. Kostentheoretische Verallgemeinerung der aufgezeigten Zusammenhänge

Die Ausführungen im vorausgehenden Abschnitt zeigen, daß die optimale Fahrgeschwindigkeit bei Zeitlohn von den Faktorpreisen abhängig, bei Akkordlohn dagegen von den Faktorpreisen unabhängig ist. Dies legt folgende Fragen nahe:

1. Worauf ist dies zurückzuführen?
2. Ist dies eine Besonderheit der optimalen Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen oder handelt es sich um einen Sachverhalt von umfassenderer kostentheoretischer Bedeutung?

Ad 1.: Der wesentliche Unterschied zwischen Zeitlohn und Akkordlohn besteht darin, daß der Akkordlohn sowohl von der Leistungsintensität (Fahrgeschwindigkeit) als auch von der Leistungszeit abhängig ist, während der Zeitlohn nur von der Leistungszeit oder von der Leistungsintensität abhängig ist (über die Beziehung $t = M:x$). Aufgrund dessen tritt in der Kostenfunktion (10) der Akkordlohn in der Form $\pi_{2A} \cdot M$ auf, während der Zeitlohn in der Kostenfunktion (6) die Form $\pi_2 \cdot \frac{M}{x}$ besitzt. Dies hat zur Folge, daß im Rahmen der für die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit erforderlichen Differentiation nach x der Akkordlohn (weil x -frei) entfällt, während der Zeitlohn die Form $-\pi_2 \cdot \frac{M}{x^2}$ annimmt.

Ad 2.: Der für Akkordlohn und Zeitlohn aufgezeigte Sachverhalt ist keine Besonderheit der optimalen Fahrgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen, sondern: Für die Kosten in Abhängigkeit von der Produktionsgeschwindigkeit werden üblicherweise, und zwar sowohl für die Produktionsfunktion vom Typ A (Anpassung nach dem Ertragsgesetz) als auch für die Produktionsfunktion vom Typ B (intensitätsmäßige Anpassung) Funktionen der Form

$$K(x) = ax^3 + bx^2 + cx + K_c$$

angenommen. Optimal ist diejenige Produktionsgeschwindigkeit, welche die variablen "Stückkosten"¹⁾ $k_v(x)$ minimiert. Für letztere gilt:

$$k_v(x) = \frac{K_v(x)}{x} = ax^2 + bx + c.$$

In dieser Funktion entfällt c bei der Differentiation nach x . Das bedeutet: Alle in x linearen Größen haben auf die optimale Produktionsgeschwindigkeit keinen Einfluß. Da der Akkordlohn in x linear ist, gilt dies auch für den Akkordlohn, aber eben nicht nur für den Akkordlohn. Es gilt vielmehr grundsätzlich für alle Faktoren, welche in der Funktion $K(x)$ in x linear und deshalb in der Stückkostenfunktion konstant sind. Es trifft z.B. weitgehend für Faktoren zu, die Werkstoffe²⁾ darstellen, also insbesondere für Rohstoffe, Einbauteile usw., die in der Regel mehr als 50 % der gesamten Kosten eines Betriebs ausmachen.

Auch der Zeitlohn ist nur ein Beispiel, wenn auch wohl das bedeutendste, einer Gruppe von Kostenarten, die nur von der Leistungszeit oder von der Leistungsintensität abhängig sind. Diese Gruppe von Kostenarten ist bisher bei der Bestimmung der optimalen Produktionsgeschwindigkeit und der optimalen Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung kaum berücksichtigt worden, obwohl ihr sowohl erhebliche praktische als auch theoretische Bedeutung zukommt. Neben dem Zeitlohn gehören zu dieser Gruppe von Kostenarten z.B. die Leerlaufkosten eines Aggregats, die Kosten der Beleuchtung, aber auch zur Laufzeit proportionale Abschreibungen, sofern

1) Als variable "Stückkosten" können in diesem Fall sowohl die variablen Kosten pro Einheit der Leistungsintensität, also $K_v(x):x$ mit der Dimension $DM/ME: ME/ZE = DM/ZE$, als auch unmittelbar die K_v Kosten pro Mengeneinheit aufgefaßt werden, für die gilt $C(x):M$, ebenfalls mit der Dimension DM/ME .

2) Zum Begriff Werkstoff vgl. E. Gutenberg, Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1, Die Produktion, 22. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York, S. 4 f. und 122 ff.

die abbeschriebenen Anlagen knappe Faktoren sind und/oder zeitelastische Potentialfaktoren darstellen, so daß ein in Periode T nicht genutztes Leistungspotential ohne Wertverlust in die Periode T+1 übertragen werden kann.

Eine gewisse Schwierigkeit besteht darin, daß die Zeitlöhne drei Stufen umfassen:

1. Zeitlöhne, die bereits ab der Leistungszeit Null zu zahlen, also voll zur Leistungszeit proportional sind,
2. Zeitlöhne, für welche ab der Unterschreitung einer Leistungszeit ein garantierter Mindestlohn zu zahlen ist, also wie die üblichen Fixkosten K_C als kalenderzeitproportionale Fixkosten zu behandeln sind,
3. Zeitlöhne, die ab der Überschreitung der üblichen Arbeitszeit in Form von Überstundenzuschlägen zu zahlen sind.

Die Berücksichtigung der vorgenannten Differenzierung würde die vorliegende Untersuchung zu umfangreich werden lassen. Im folgenden wird deshalb nur die erstgenannte Art von Zeitlöhnen behandelt¹⁾.

¹⁾ Für eine vollständige Behandlung vgl. L. Pack, Die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 200 ff. und S. 218 ff.

II. Darstellung des Zwei-Faktoren-Falls anhand eines Zahlenbeispiels

Zur Verdeutlichung der zuvor allgemein abgeleiteten Zusammenhänge sei im folgenden ein Zahlenbeispiel dargestellt. Um nicht eine bestimmte Automobilmарke hierbei besonders herauszustellen, wird mit einem Beispiel gearbeitet, das zwar nicht für ein real existierendes Auto gilt, den empirischen Gegebenheiten aber bereits sehr nahe kommt.

1. Die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit

a) Der Fall, daß Zeitlohn gezahlt wird

Für den Kraftstoffverbrauch $r_1(x)$ (in l/100 km) eines Kraftfahrzeugs gelte bei Fahren im höchsten Gang für alternative, im Zeitverlauf konstante Fahrgeschwindigkeiten x [km/h] als spezifischer Kraftstoffverbrauch (sogenannter Teillastverbrauch):

$$(13) \quad r_1(x) = \frac{1}{1250} x^2 - \frac{3}{50} x + 8 \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$$

Der Kraftstoffpreis betrage 1,25 DM/l. Der zurückzulegende Weg sei 100 km. Der Lohnsatz bzw. die entsprechenden Opportunitätskosten seien 20,- DM/Std. (es wird also Zeitlohn gezahlt). Aus Gründen der Vereinfachung wird zunächst nicht berücksichtigt, daß für jeden Kraftwagen eine Höchstgeschwindigkeit gilt, die niedriger als die optimale Fahrgeschwindigkeit sein kann, und zwar dann, wenn der Lohnsatz gegenüber dem Kraftstoffpreis relativ hoch ist. Dieser Sachverhalt wird erst in Kapitel 4 beachtet werden.

Die zu beantwortende Frage lautet:

Welche Fahrgeschwindigkeit führt unter den genannten Bedingungen pro gefahrenen Kilometer zum Minimum der Summe aus Kraftstoff- und Lohnkosten, also zum Minimum der entscheidungsrelevanten Kosten pro Kilometer?

Die auf der Vorseite angegebene Funktion $r_1(x)$ ist graphisch in Abb. 5 wiedergegeben.

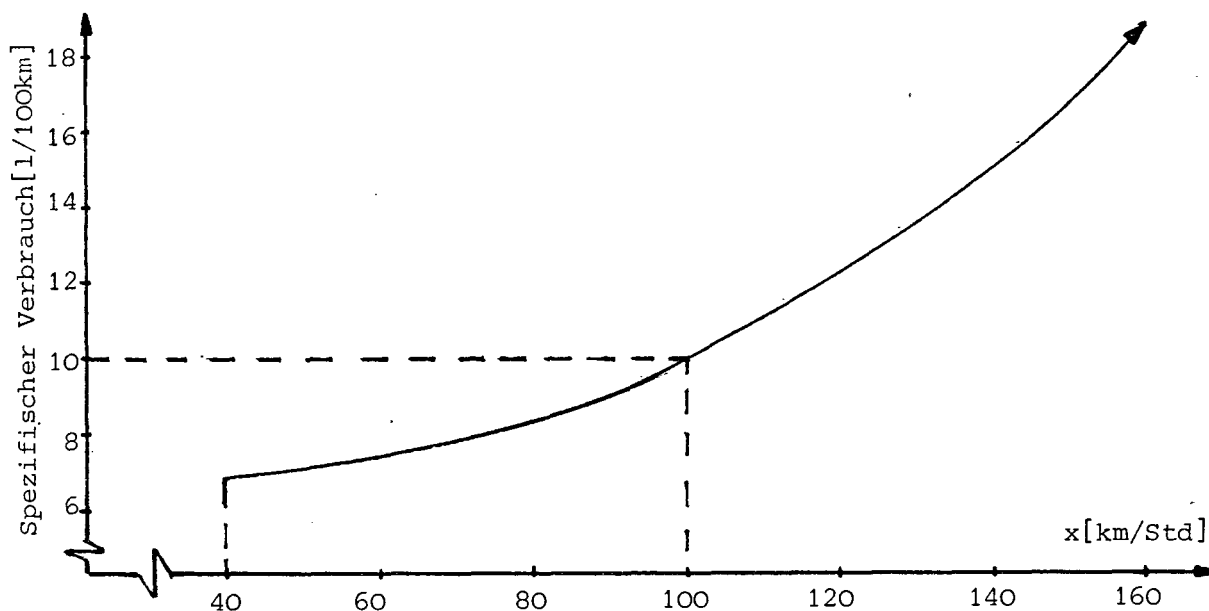


Abb. 5: Die den spezifischen Kraftstoffverbrauch definierende Funktion $r_1(x) = \frac{1}{1250} x^2 - \frac{3}{50} x + 8 \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$

Unter Verwendung von (13) lassen sich Isoquanten für alternative Fahrstrecken M [km] berechnen, und zwar in Abhängigkeit von der Fahrzeit t und dem (absoluten) Kraftstoffverbrauch (in Liter). Dabei wird die Fahrzeit (d.h. der Faktor 2) als unabhängige Variable behandelt und wie üblich auf der Abszisse abgetragen.

Der absolute Verbrauch an Kraftstoff (Faktor 1) sei mit R_1 bezeichnet. Von (1) ausgehend erhält man dann für eine Fahrstrecke von M [km]:

$$R_1(M, x) = \frac{C_1[M(x, t)]}{\pi_1} = \frac{\pi_1 \cdot r_1(x)}{100} \cdot M[\text{DM}] : \pi_1 \left[\frac{\text{DM}}{1} \right] = \frac{r_1(x)}{100} \cdot M[1]$$

Der Verbrauch an menschlicher Arbeitskraft (Faktor 2) sei mit R_2 bezeichnet. Von (3) ausgehend, ergibt sich dann für eine Fahrstrecke von M [km]:

$$R_2(M, x) = \frac{C_2[M(x, t)]}{\pi_2} = \pi_2 \cdot \frac{M}{x} [\text{DM}] : \pi_2 \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right] = \frac{M}{x} [\text{Std}] = t [\text{Std}]$$

Im vorliegenden Fall liefert R_2 also t sofort in der gewünschten Form als unabhängige Variable. Um $R_1(M, x)$ in Abhängigkeit von t darzustellen, braucht man darin nur x durch $\frac{M}{t}$ zu ersetzen. Dann erhält man als Gleichung der zur Fahrstrecke M gehörigen Isoquanten:

$$R_1(M, t) = \frac{r_1 \cdot \left(\frac{M}{t}\right)}{100} \cdot M [1]$$

Für das verwandte Zahlenbeispiel ergibt das den Kraftstoffverbrauch:

$$(14) R_1(M, t) = \frac{M}{100} \cdot \left[\frac{1}{1.250} \left(\frac{M}{t}\right)^2 - \frac{3}{50} \frac{M}{t} + 8 \right] [1]$$

Daraus folgt für $M = 100$:

$$R_1(M=100, t) = \frac{8}{t^2} - \frac{6}{t} + 8 [1]$$

Für $M = 120$ erhält man:

$$R_1(M=120, t) = \frac{13,824}{t^2} - \frac{8,64}{t} + 9,6 [1]$$

Von (14) ausgehend ergeben sich für die Isoquanten folgende Werte, die anschließend graphisch in Abb. 6 wiedergegeben werden.

Fahrzeit t [Std]	$M = 100$ km		$M = 120$ km	
	Kraftstoff- verbrauch $R_1(M=100, t) [1]$	Fahrgeschw. $x = \frac{M}{t} = \frac{100}{t} \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right]$	Kraftstoff- verbrauch $R_1(M=120, t) [1]$	Fahrgeschw. $x = \frac{M}{t} = \frac{120}{t} \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right]$
2	7,00	50	8,74	60
1,75	7,18	57,14	9,18	68,57
1,5	7,56	66,67	9,98	80
1,25	8,32	80	11,54	96
1,0	10,00	100	14,78	120
0,9	11,21	111,11	17,07	133,33
0,8	13,00	125	20,40	150
0,75	14,22	133,33	22,66	160
0,7	15,76	142,86	25,47	171,43
0,65	17,70	153,85	29,03	184,62
0,6	20,22	166,67	33,60	200
0,55	23,54	181,82	39,59	218,18
0,5	28,00	200	47,62	240

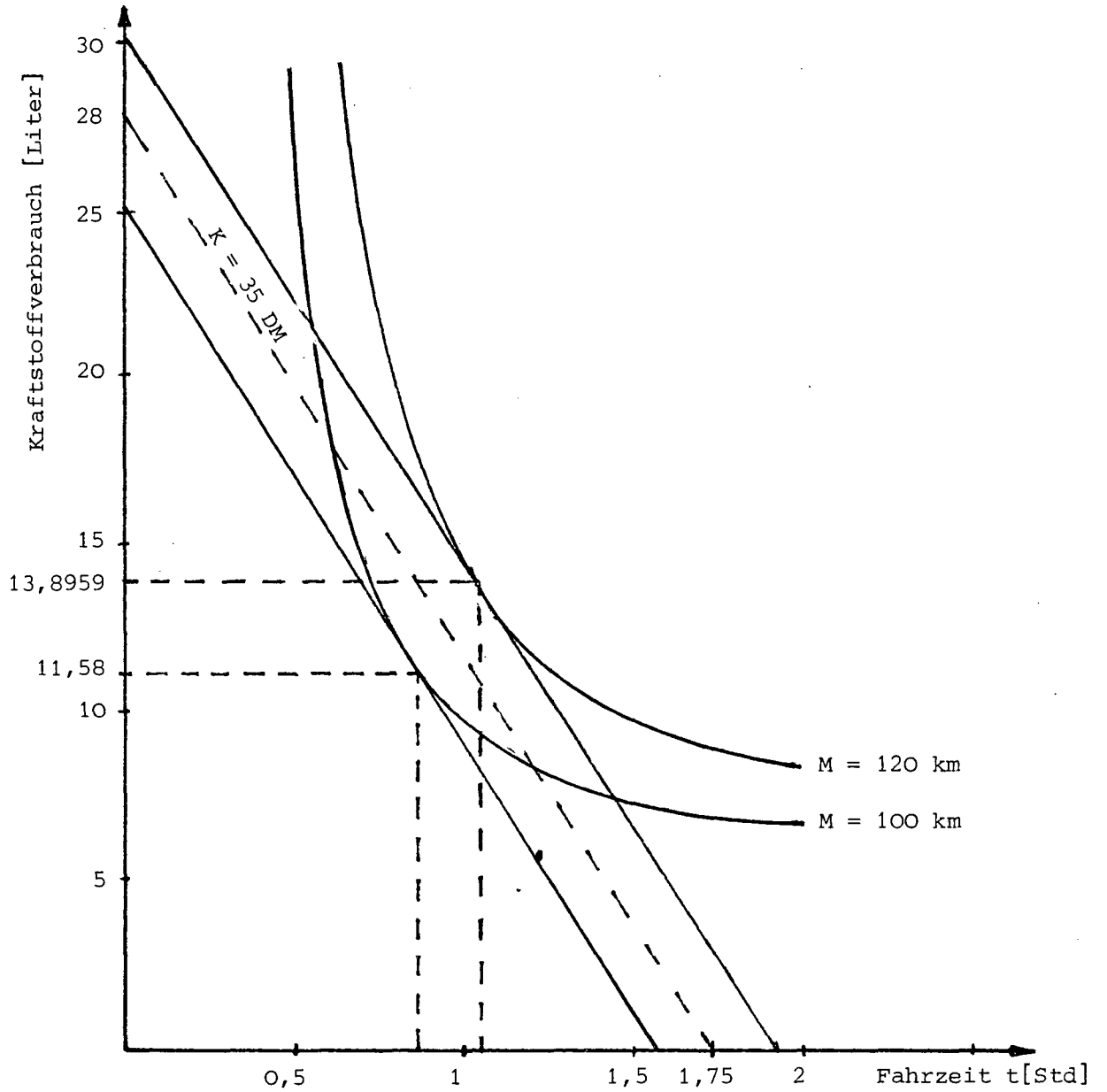


Abb. 6: Graphische Bestimmung der optimalen Kombination von Fahrzeit und Fahrgeschwindigkeit

Nun benötigt man zur graphischen Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit (bzw. der Minimalkostenkombination der beiden Faktoren) noch eine Isokostenlinie, d.h. eine Gerade, welche die Faktormengenkombinationen miteinander verbindet, deren Kostensumme gleich groß ist.

Im vorliegenden Fall lautet die Gleichung der Isokostenlinie:

$$K = \frac{K}{1,25} - \frac{20}{1,25} \cdot R_2; \text{ ihre Steigung ist also } - \frac{20}{1,25} = - 16.$$

Für die Einzeichnung einer Isokostenlinie geht man am einfachsten wie folgt vor:

- (1) Man wählt einen beliebigen Kostenbetrag, z.B. $K = 35$ DM
- (2) Man dividiert K durch π_1 ; hier ergibt dies $35 : 1,25 = 28$ und erhält den Schnittpunkt der Isokostenlinie mit der R_1 -Achse.
- (3) Man dividiert K durch π_2 ; hier ergibt das $35 : 20 = 1,75$ als Schnittpunkt der Isokostenlinie mit der R_2 -Achse.
- (4) Man verbindet die Schnittpunkte gemäß (2) und (3) durch die Isokostenlinie.

Zur Bestimmung der Minimalkostenkombination ist die Isokostenlinie solange parallel zu sich selbst zu verschieben, bis sie die Isoquante tangiert. Für $M = 100$ km sind die Koordinaten des Tangentialpunkts:

$$t_{\text{opt}} = R_{2_{\text{opt}}} = 0,876 \text{ Std} = 52,56 \text{ Min (genauer 52,5438 Min)}$$

$$R_{1_{\text{opt}}} = 11,58 \text{ l}$$

Wegen $x = \frac{M}{t}$ folgt aus t_{opt} :

$$x_{\text{opt}} = \frac{100}{0,876} = 114,16 \text{ km/h (genauer 114,1904)}.$$

Daß die Steigung der Isoquante für t_{opt} gleich - 16 ist, ergibt sich auch aus (14). Dazu ist $t_{opt} = 0,87573$ in die erste Ableitung von (14) nach t einzusetzen. Dies ergibt:

$$\frac{1}{100} \cdot \left[- \frac{2}{1250} \cdot \left(\frac{100}{0,87573} \right)^3 + \frac{3}{50} \cdot \left(\frac{100}{0,87573} \right)^2 \right] = - 16$$

Für eine Fahrstrecke von 120 km ergibt sich dieselbe optimale Fahrgeschwindigkeit $x_{opt} = 114,19$ km/h. Dies ist die Folge davon, daß x_{opt} , wie gezeigt, von M unabhängig ist. Die optimale Fahrzeit ist dann $\frac{120}{x_{opt}} = 1,051$ Stunden.

Das "Ideale-Spar-Tempo" IST nach Brezing würde sich dagegen von M , π_1 und π_2 unabhängig errechnen mit

$$x_{IST} = \sqrt{\frac{8}{1/1250}} = \sqrt{10.000} = 100 \text{ km/Std}$$

Wenn, wie hier, das Optimierungskriterium bekannt ist (vgl. (7)), dann kann die optimale Fahrgeschwindigkeit graphisch wesentlich einfacher als in Abb. 6 bestimmt werden. Dazu stellt man die linke Seite von (7), also:

$$\frac{2ax^3 + bx^2}{100} = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{2}{1250} x^3 - \frac{3}{50} x^2 \right)$$

so dar, wie in Abb. 7 geschehen und zeichnet zusätzlich parallel zur Abszisse im Abstand $\frac{\pi_2}{\pi_1}$, der hier gleich $20 : 1,25 = 16$ ist, eine Gerade ein. Der Schnittpunkt zwischen Kurve und Gerade definiert die optimale Fahrgeschwindigkeit.

Neben der Einfachheit des Vorgehens liegt ein weiterer Vorteil dieser Form der Darstellung darin, daß die optimale Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Faktorpreise sehr leicht zu bestimmen ist. Man braucht dazu nur die dem veränderten Verhältnis der Preise π_2 und π_1 entsprechenden Geraden einzuzichnen; ihre Schnittpunkte mit der Kurve definieren die zugehörigen optimalen Fahrgeschwindigkeiten.

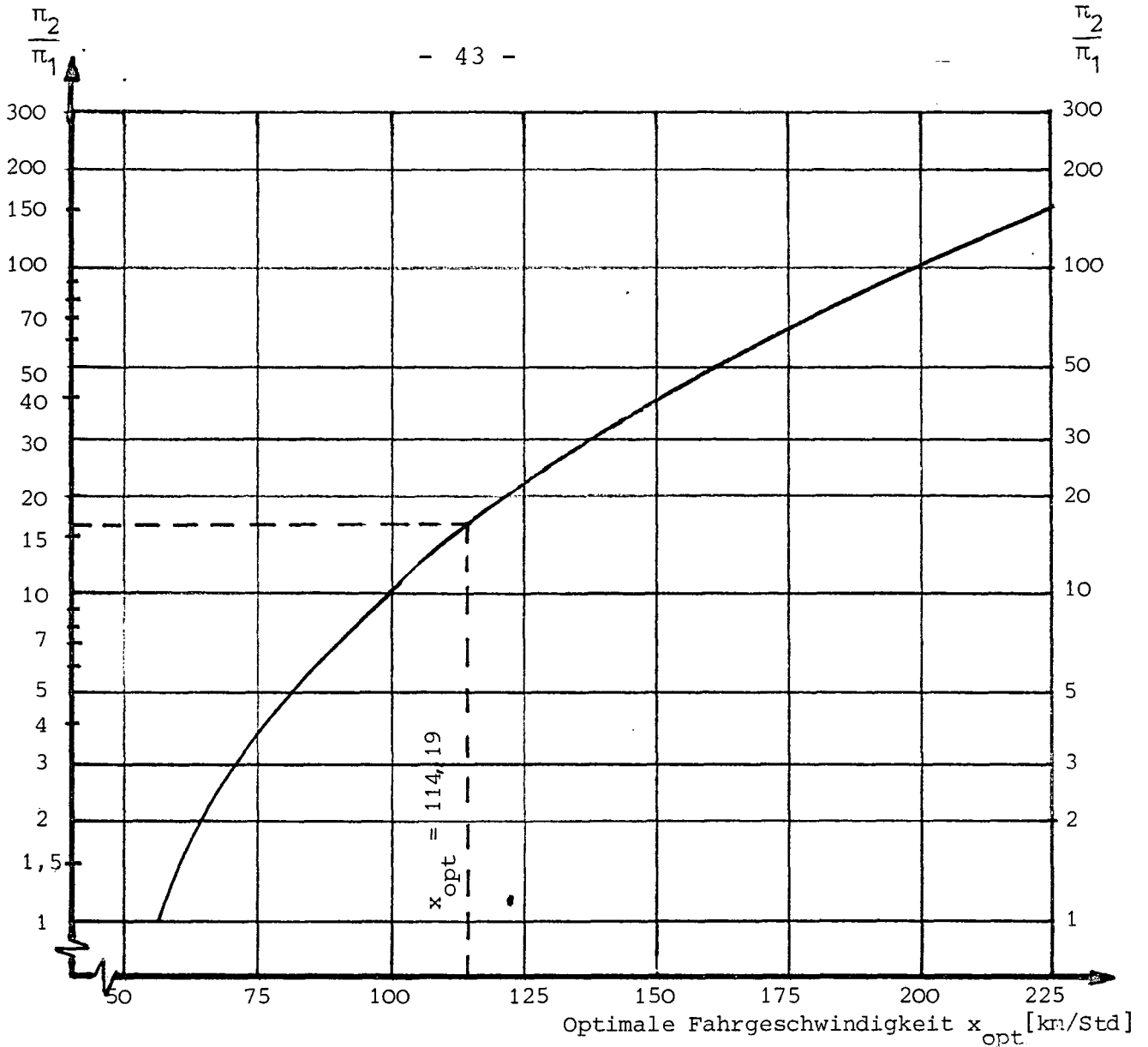


Abb. 7: Graphische Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit unter Verwendung von Kriterium (7)

Auch die algebraische Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit ist dann, wenn man vom Optimierungskriterium (7) ausgeht, recht einfach möglich. Durch Lösung von (7), das im Zahlenbeispiel die Form

$$\frac{1}{100} \left(\frac{2}{1250} x^3 - \frac{3}{50} x^2 \right) = \frac{20}{1,25} = 16$$

annimmt, erhält man $x_{opt} = 114,19$ sowie $t_{opt} = 0,87573$ Std. für $M = 100$ km bzw. $1,051$ Std. für $M = 120$ km.

Um die Querverbindungen zur Bestimmung der Minimalkostenkombination zweier Faktoren in der Produktionstheorie besser aufzeigen zu können, sei ergänzend gezeigt, wie die Minimalkostenkombination algebraisch ohne Rückgriff auf Kriterium (7) nach dem sogenannten "Tangentenphänomen" (vgl. Abb. 6) für das verwandte Zahlenbeispiel bestimmt werden kann.

Für die Fahrstrecke ("Ertrag" bzw. "Produktmenge") M gilt die Produktionsfunktion

$$M = M(x, t) = x \cdot t.$$

Eingesetzt werden die Faktoren 1 und 2 in den Mengen R_1 und R_2 , wobei $R_2 = t = \frac{M}{x}$ ist. Für R_1 gilt

$$R_1(x) = \tilde{R}_1\left(\frac{M}{R_2}\right), \text{ weil } x = \frac{M}{R_2}.$$

R_2 kann als unabhängige Variable behandelt werden.

Zu minimieren ist die Kostenfunktion:

$$K(M) = \pi_1 \cdot R_1 + \pi_2 \cdot R_2$$

unter der Nebenbedingung

$$\bar{M} = x(R_2) \cdot R_2, \text{ woraus } x(R_2) = \frac{\bar{M}}{R_2} \text{ folgt.}$$

Auch hier gilt die für die graphische Lösung bereits abgeleitete Gleichung:

$$R_1(x)[1] = \frac{r_1(x)}{100} \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot M[\text{km}] = \frac{r_1(x)}{100} \cdot M[1]$$

Explizit erhält man im vorliegenden Fall für R_1 unter Beachtung von $x(R_2) = \frac{M}{R_2}$:

$$\tilde{R}_1(R_2)[1] = \left[\frac{1}{1250} \left(\frac{M}{R_2} \right)^2 - \frac{3}{50} \left(\frac{M}{R_2} \right) + 8 \right] \cdot \frac{M}{100}[1]$$

Hieraus folgt für $M = 100$:

$$\tilde{R}_1(R_2)[1] = \frac{8}{R_2} - \frac{6}{R_2} + 8$$

Für die Minimalkostenkombination muß nun die aus der Produktionstheorie bekannte Bedingung

$$-\frac{\pi_2}{\pi_1} = \frac{dR_1}{dR_2} \quad (\text{Tangentenphänomen})$$

erfüllt sein.

Ausgehend von (14) und $t = R_2$ erhält man für $M = 100$:

$$\frac{dR_1}{dR_2} = -\frac{16}{R_2^3} + \frac{6}{R_2^2}$$

Für $-\frac{\pi_2}{\pi_1} = -\frac{20}{1,25}$ erhält man -16 .

Die Bestimmungsgleichung für $R_{2\text{opt}}$ lautet also:

$$\frac{16}{R_2^3} - \frac{6}{R_2^2} = 16$$

Als Lösung dieser Gleichung erhält man:

$$R_{2\text{opt}} = 0,87573 \text{ Std.} = 52,5438 \text{ Min.}$$

Daraus folgt:

$$x = \frac{M}{R_2} = \frac{100}{0,87573} = 114,1904 \text{ km/h}$$

Für eine Strecke von 100 km erhält man dann

(a) aus $r_1(x)$ einen Kraftstoffverbrauch von 11,58 l bzw. Kraftstoffkosten von $11,58 \text{ l} \cdot 1,25 \text{ DM/l} = 14,475 \text{ DM}$;

(b) einen Verbrauch an Zeit von 0,87573 Std. bzw. Lohnkosten von $0,87573 \text{ Std.} \cdot 20 \text{ DM/Std.} = 17,51 \text{ DM}$.

Die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten der Strecke von 100 km sind also

$$14,475 + 17,51 = 31,985 \approx 32 \text{ DM/100 km}$$

Die für das vorliegende Zahlenbeispiel bei vorgegebenem Kraftstoffpreis (in DM/l) und Lohnsatz (in DM/Std) sich ergebenden optimalen Fahrgeschwindigkeiten sind in der folgenden Tabelle 1 wiedergegeben. Die den angegebenen optimalen Fahrgeschwindigkeiten entsprechenden optimalen Fahrzeiten können leicht in der Weise berechnet werden, daß die Strecke, die man zu fahren wünscht, durch die optimale Fahrgeschwindigkeit dividiert wird. Wie bei der allgemeinen Ableitung des weiter oben wiedergegebenen Optimierungskriteriums (7) gezeigt worden ist, gilt die optimale Fahrgeschwindigkeit nämlich unabhängig von der zu fahrenden Strecke.

Sowohl aus Abb. 7 als auch aus Tab. 1 geht hervor: wenn der Lohnsatz relativ stärker steigt als der Kraftstoffpreis, $\pi_2:\pi_1$ also zunimmt, dann steigt auch die optimale Fahrgeschwindigkeit, und zwar so erheblich, daß bald Fahrgeschwindigkeiten als "optimal" errechnet werden, die im Straßenverkehr nicht mehr realisierbar sind bzw. die Höchstgeschwindigkeit normaler Kraftfahrzeuge übersteigen. Dabei ist zu beachten, daß x_{opt} das Minimum der entscheidungsrelevanten Kosten pro Kilometer darstellt. Würde man das Minimum der Gesamtkosten ermitteln, also auch noch die fixen Kosten bei der Minimierung der Kosten pro Kilometer berücksichtigen, ergäben sich noch wesentlich höhere Geschwindigkeiten als optimal.

Tab.: 1 Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis π_1 und vom Stundenlohnsatz π_2 bei Zeitlohn.

Wagentyp: Musterbeispiel

Lohn- satz π_2 [DM/Std]	Kraftstoffpreis π_1 in DM / l													
	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	2.00	2.20	2.50	3.00
3	69.68	69.00	68.36	67.75	67.18	66.63	66.10	65.13	64.23	63.41	61.94	60.66	59.03	56.84
5	79.11	78.29	77.51	76.77	76.07	75.40	74.77	73.58	72.49	71.48	69.68	68.12	66.10	63.41
10	95.09	94.04	93.04	92.09	91.19	90.33	89.51	87.97	86.56	85.26	82.93	80.90	78.29	74.77
15	106.45	105.23	104.08	102.98	101.94	100.95	100.00	98.23	96.60	95.09	92.40	90.05	87.02	82.93
20	115.54	114.19	112.92	111.70	110.55	109.46	108.41	106.45	104.65	102.98	100.00	97.40	94.04	89.51
25	123.24	121.78	120.41	119.10	117.85	116.67	115.54	113.42	111.47	109.67	106.45	103.63	100.00	95.09
30	129.98	128.43	126.97	125.58	124.25	122.99	121.78	119.53	117.45	115.54	112.10	109.10	105.23	100.00
40	141.52	139.81	138.20	136.66	135.20	133.80	132.47	129.98	127.69	125.58	121.78	118.47	114.19	108.41
50	151.28	149.44	147.70	146.04	144.46	142.96	141.52	138.83	136.36	134.08	129.98	126.40	121.78	115.54
70	167.48	165.41	163.46	161.60	159.83	158.14	156.53	153.52	150.75	148.19	143.59	139.58	134.39	127.38
100	186.78	184.46	182.25	180.15	178.16	176.25	174.44	171.03	167.91	165.01	159.83	155.30	149.44	141.52
150	211.75	209.08	206.54	204.14	201.85	199.67	197.59	193.69	190.10	186.78	180.84	175.64	168.92	159.83
200	231.64	228.70	225.91	223.26	220.74	218.34	216.04	211.75	207.79	204.14	197.59	191.86	184.46	174.44
300	263.15	259.78	256.58	253.55	250.66	247.91	245.28	240.35	235.82	231.64	224.13	217.56	209.08	197.59

Stundenlohn π_2 [DM/Std] Kraftstoffpreis π_1 [DM/l]	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	100:1	200:1
optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} [km/Std]	66,10	72,84	82,93	100,00	112,10	121,78	137,16	159,83	197,59	245,28

Tab. 2: Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\pi_2:\pi_1$ [l/Std]

Der in Tab. 1 wiedergegebene Sachverhalt kann wesentlich komprimiert werden, wenn man den Lohnsatz und den Kraftstoffpreis nicht isoliert betrachtet, sondern von ihrem Quotienten ausgeht. Dann erhält man π_2 [DM/Std] : π_1 [DM/l] = π_2/π_1 [l/Std], eine Größe also, die angibt, wieviel Liter Kraftstoff soviel kosten wie 1 Stunde menschliche Arbeit. Diese Größe sei als "stundenlohnäquivalente Kraftstoffmenge" bezeichnet.

Für den im Musterbeispiel betrachteten Fall eines Benzinpreises von 1,25 DM/l und eines Lohnsatzes von 20 DM/Std., erhält man dann als Quotienten von π_2 und π_1 den Wert $20:1,25 = 16:1 = 16$; d.h. für 1 Stundenlohn kann man 16 l Kraftstoff kaufen. Bei dieser Vorgehensweise reduziert sich die Tab. 1 auf eine einzige Zeile, bzw. auf so viel Zeilen, wie Kraftfahrzeugtypen verglichen werden. Geht man vom benutzten Zahlenbeispiel aus, kommt man zu den in Tab. 2 wiedergegebenen Ergebnissen.

Aus Tab. 2 geht sehr deutlich hervor, daß bei Zeitlohn dann, wenn der Lohnsatz relativ zum Kraftstoffpreis steigt, und infolgedessen die stundenlohnäquivalente Kraftstoffmenge zunimmt, die optimale Fahrgeschwindigkeit erheblich höher wird. Umgekehrt führt ein relatives Absinken des Lohnsatzes zu einer ins Gewicht fallenden Abnahme der optimalen Fahrgeschwindigkeit.

b) Der Fall, daß Akkordlohn gezahlt wird

Bei Akkordlohn ist die optimale Fahrgeschwindigkeit durch (11) definiert und bekanntlich von M , π_1 und π_{2A} bzw. π_{2Z} unabhängig. Sie beträgt deshalb für Stückakkord wie auch für Stückzeitakkord:

$$x_{\text{opt}} = - \frac{b}{2a} = \frac{3}{50} : \frac{2}{1250} = \frac{3 \cdot 1250}{2 \cdot 50} = 37,5 \left[\frac{\text{km}}{\text{Std}} \right]$$

Wie bereits weiter oben ausgeführt, ist dies ein theoretischer Wert, der im praktischen Verkehr auf die Dauer nicht realisiert werden sollte, weil sonst der Motor Schaden nehmen kann.

2. Bestimmung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer

Nun interessiert für praktische Anwendungen natürlich nicht nur die optimale Fahrgeschwindigkeit, sondern auch die Höhe der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer, welche der optimalen Fahrgeschwindigkeit zugeordnet sind. In Fortführung der bisherigen Vorgehensweise werden dabei natürlich nur diejenigen Kosten berücksichtigt, die in die Optimierungsrechnung eingehen, also nur die Kosten, welche durch die Fahrgeschwindigkeit und/oder die Fahrzeit verursacht, bzw. in ihrer Höhe beeinflusst werden, kurz: die entscheidungsrelevant sind.¹⁾

Wird Zeitlohn gezahlt, so geht man zur Bestimmung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer, wenn man möglichst am Anfang unserer Überlegungen beginnen will, von (6) aus. Zur Bestimmung der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer wird (6) durch die Fahrstrecke M dividiert und man erhält:

$$(15) \quad \frac{C_e^2(M, x)}{M} = k_e(x) = \frac{\pi_1}{100} \cdot (ax^2 + bx + c) + \frac{\pi_2}{x} \left[\frac{DM}{km} \right]$$

Will man diesen Ausdruck tabellieren, dann hat dies den Nachteil, daß π_1 und π_2 (wie in Tab. 1) einzeln vorgegeben werden müssen. Um dies zu vermeiden, bietet es sich an, den Ausdruck durch π_1 zu dividieren. Dann erhält man:

$$(16) \quad \frac{C_e^2(M, x)}{\pi_1 \cdot M} = \frac{k_e(x)}{\pi_1} = \frac{1}{100} \cdot (ax^2 + bx + c) + \frac{\pi_2}{\pi_1 \cdot x} \left[\frac{1}{km} \right]$$

Auf diese Weise tritt an die Stelle eines Ausdrucks mit der Dimension DM/km ein Ausdruck mit der Dimension 1/km. D.h.: die entscheidungsrelevanten Kosten pro Kilometer werden durch die mit ihnen beim gegebenen Kraftstoffpreis π_1 äquivalente Kraftstoffmenge dargestellt. (16) definiert also diejenige Kraftstoffmenge,

¹⁾ Dabei ist zu beachten, daß wegen $M = x \cdot t$ Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit stets auch Abhängigkeit von der Fahrzeit zur Folge hat (und umgekehrt), weil bei gegebener Strecke M Fahrgeschwindigkeit x und Fahrzeit t sich gegenseitig definieren.

welche man für $k_e^2(x)$ D-Mark beim Kraftstoffpreis π_1 [DM/l] kaufen kann.¹⁾

Die durch (16) definierte Kraftstoffmenge sei im folgenden zur Vereinfachung der Ausdrucksweise als "kostenäquivalente Kraftstoffmenge" bezeichnet, wobei es sich, wie gezeigt, um die mit den entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer beim Kraftstoffpreis π_1 [DM/l] wertgleiche Kraftstoffmenge handelt.

Setzt man in (16) unser Zahlenbeispiel ein und den durch (7) definierten, in Tab. 2 wiedergegebenen Wert von x_{opt} , dann erhält man Tab. 3. Die Werte in Tab. 3 sind also definiert durch:

$$(17) \frac{k_e^2(x_{opt})}{\pi_1} = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{1}{1250} x_{opt}^2 - \frac{3}{50} x_{opt} + 8 \right) + \frac{\pi_2}{\pi_1 \cdot x_{opt}} \left[\frac{1}{\text{km}} \right]$$

Weil man gewohnt ist, Kraftstoffmengen in l/100 km anzugeben, und um Mengen zu vermeiden, die fast immer kleiner als 1 sind, wird in Tab. 3 und den entsprechenden folgenden Tabellen die kostenäquivalente Kraftstoffmenge nicht in l/km, sondern in l/100 km angegeben, also mit dem 100-fachen der nach (17) sich ergebenden Menge.

¹⁾ In Verbindung mit den Tab. 4 bis 7 wird sich zeigen, daß die vorgenommene Division durch π_1 nicht nur Tab. 3 wesentlich komprimiert, sondern die Werte in den Tab. 4 bis 7 unbeeinflusst läßt, weil dort π_1 im Zähler und Nenner vorkommt und sich auf diese Weise wegkürzen läßt.

Stundenlohn π_2 [DM/Std]	200:1	100:1	50:1	30:1	20:1	15:1	10:1	5:1	3:1	2:1
Kraftstoffpreis π_1 [DM/l]	122,95	77,99	50,13	36,69	28,98	24,71	20,00	14,56	11,99	10,56
Min. Kosten [DM/km]										
Kraftstoffpreis [DM/l]										

Tab. 3: Die minimale kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in 1/100 km) in Abhängigkeit von der Stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge bei Zeitlohn

Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei nochmals darauf verwiesen, daß in Tab. 3 natürlich nicht die gesamten Kosten eines Kraftfahrzeugs berücksichtigt sind, sondern nur seine von der Fahrgeschwindigkeit abhängigen Kosten; hier sind dies nur Kraftstoff- und Lohnkosten.

In Verbindung mit Tab. 1 wurde bereits darauf verwiesen, daß die für den Fall des Akkordlohns ermittelte optimale Fahrgeschwindigkeit keine praktische Bedeutung hat. Hier geht es jedoch auch darum, theoretische Zusammenhänge aufzuzeigen. Weil die hier praktisch irrelevanten Zusammenhänge in anders gelagerten Fällen durchaus praktisch relevant werden können, seien deshalb dennoch die für Tab. 3 im Fall der Zahlung von Akkordlohn sich ergebenden minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer wenigstens beispielhaft mit der Höhe aufgeführt, die sich im Falle praktischer Relevanz aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge und des verwandten Zahlenbeispiels bei Zahlung von Akkordlohn ergeben würde. Allgemein gilt, wenn Stückakkord gezahlt wird (vgl. (11)):

$$\frac{C_e^2(M, x_{opt})}{M} = K_e^2(x_{opt}) \cdot \frac{\pi_1}{100} \cdot \left[a \left(\frac{-b}{2a} \right)^2 + b \left(\frac{-b}{2a} \right) + c \right] + \pi_{2A} \left[\frac{DM}{km} \right]$$

Setzt man die Werte des Zahlenbeispiels ein, erhält man:

$$\frac{C_e^2(M, x_{opt})}{M} = K_e^2(x_{opt}) \cdot \frac{\pi_1}{100} \cdot \left[\frac{1}{1250} \cdot 37,5^2 + \left(-\frac{3}{50} \right) \cdot 37,5 + 8 \right] + \pi_{2A}$$

Will man halbwegs plausible Vergleiche zwischen Zeitlohn und Akkordlohn durchführen, ist es notwendig, für den Stückakkord π_{2A} einen Betrag anzusetzen, der pro Stunde mindestens zu einem Lohn in Höhe des Zeitlohns führt, also die Bedingung:

$$x_{\text{opt}} \cdot \pi_{2A} \geq \pi_2$$

erfüllt. Daraus folgt dann für π_{2A} , wenn die Mindestbedingung gerade erfüllt ist,

$$\pi_{2A} = \frac{\pi_2}{x_{\text{opt}}} \quad \text{bzw. hier:} \quad \frac{\pi_2}{37,5} \left[\frac{\text{DM}}{\text{km}} \right]$$

In der für die Bestimmung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer geltenden Gleichung (17) ist also der letzte Summand π_{2A} durch $\frac{\pi_2}{x_{\text{opt}}} = \frac{\pi_2}{37,5}$ zu ersetzen. Dividiert man dann zur Komprimierung der Darstellung auch im vorliegenden Fall die genannte Gleichung noch durch π_1 , erhält man:

$$(18) \quad \frac{K_e^2(x_{\text{opt}})}{\pi_1} = \frac{1}{100} \cdot \left[\frac{1}{1250} \cdot 37,5^2 - \frac{3}{50} \cdot 37,5 + 8 \right] + \frac{\pi_2}{37,5\pi_1} \left[\frac{1}{\text{km}} \right]$$

Bei Stückakkord ergibt sich also der Form nach dieselbe Gleichung wie im Fall des Zeitlohns, nur daß x_{opt} von π_1 und π_2 unabhängig gleich 37,5 km/Std. ist. Infolgedessen erhält man anstelle von Tab. 3 die auf der folgenden Seite wiedergegebene Tab. 3A.

Stundenlohn $\pi_2 = x_{opt} \cdot \pi_{2A}$ [DM/Std]	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	100:1	200:1
Kraftstoffpreis π_1 [DM/l]										
Min. var. Kosten [DM/km]	12,2	14,9	20,2	33,5	46,9	60,2	86,9	140,2	273,5	540,2
Kraftstoffpreis [DM/l]										

Tab. 3A: Die minimale kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge bei Akkordlohn

Im Fall des Stückzeitakkords müßte man zusätzlich Überlegungen anstellen bezüglich der Größenordnung von r_{2Z} . Da aber, wie bereits gesagt, eine Akkordentlohnung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung (wegen der Nichtbeachtung von Mindestproduktions- bzw. hier Mindestfahrgeschwindigkeiten) sowieso für Kraftfahrzeuge keine realistische optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} liefert, möge $r_{2Z} \cdot \pi_{2Z}$ zusammengefaßt bleiben; dann muß analog zum Stückakkord mindestens die Bedingung erfüllt sein:

$$r_{2Z} \left[\frac{\text{Std}}{\text{km}} \right] \cdot \pi_{2Z} \left[\frac{\text{DM}}{\text{Std}} \right] = \frac{\pi_2}{x_{opt}} = \frac{\pi_2}{37,5} \left[\frac{\text{DM}}{\text{km}} \right]$$

Unter den gemachten Annahmen ergibt sich folglich dasselbe Ergebnis wie im Fall des Stückakkordlohns.

Ein Vergleich der in den Tabellen 3 und 3A enthaltenen Kosten gestattet keine Aussage darüber, ob Zeitlohn oder Akkordlohn günstiger sind, weil die Kosten in Tab. 3A nicht nur durch die irrealen optimale Fahrgeschwindigkeit $x_{opt} = 37,5 \text{ km/Std.}$, sondern auch noch durch die Annahme darüber bestimmt sind, wie groß π_{2A} bzw. π_{2Z} im Verhältnis zu π_2 sein sollen. Wegen dieser Irrealität bzw. Unsicherheit wird der Fall des Akkordlohns im folgenden nicht weiter behandelt.

Es sei jedoch noch kurz erwähnt, daß die Zahlung von Akkordlohn mit einem festen Satz π_{2A} oder $\pi_{2Z} \cdot r_{2Z}$ pro gefahrenen Kilometer zu einem grundlegenden Interessenkonflikt führt. Um sein Einkommen zu erhöhen, müßte der Fahrer versuchen, die Fahrgeschwindigkeit über die als optimal ermittelte zu steigern, während der Betrieb, wenn er die Kosten niedrig halten will, gleichzeitig versuchen muß, dies zu verhindern.

3. Sensitivitätsanalyse mit Hilfe der Variabilität der Kosten durch Berechnung von Proportionalitätsabweichungen

Schon deshalb, weil wegen Geschwindigkeitsbeschränkungen oder wegen der gegebenen Straßenlage die optimale Fahrgeschwindigkeit nicht immer eingehalten werden kann, ist es wichtig zu wissen, in welchem Umfang die Kosten steigen, wenn von der optimalen Fahrgeschwindigkeit abgewichen wird.

a) die Reaktion der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit

Um zu ermitteln, wie stark die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer auf Abweichungen von den in den Tab. 1 bzw. 2 wiedergegebenen optimalen Fahrgeschwindigkeiten reagieren, kann man zunächst die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer für Fahrgeschwindigkeiten berechnen, die von der optimalen Fahrgeschwindigkeit verschieden sind. Für das hier benutzte Zahlenbeispiel sind die dann sich ergebenden Kostenhöhen in Tabelle 4 dargestellt. Dabei ist $100 \alpha\%$ gleich dem Prozentsatz, um den die optimale Fahrgeschwindigkeit über- bzw. unterschritten wird; ein positiver Wert von α bezeichnet dabei eine Überschreitung, ein negativer Wert von α eine Unterschreitung der optimalen Fahrgeschwindigkeit. $\alpha = -0,1$ bzw. $100 \alpha\% = -10 \%$ bedeutet also eine 10-prozentige Unterschreitung, bzw. $\alpha = +0,1$ bzw. $100 \alpha\% = +10 \%$ eine 10-prozentige Überschreitung der optimalen Fahrgeschwindigkeit.

$\frac{\pi_2}{\pi_1} \left[\frac{1}{\text{Std}} \right]$	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	100:1	200:1
-30 %	11,26	12,90	15,83	22,01	27,33	32,16	40,86	55,99	87,31	137,77
-20 %	10,85	12,37	15,08	20,82	25,78	30,28	38,39	52,51	81,71	128,95
-10 %	10,62	12,08	14,68	20,19	24,96	29,28	37,09	50,68	78,86	124,34
$\alpha =$ 0 %	10,56	11,99	14,56	20,00	24,71	28,98	36,69	50,13	77,99	122,95
+10 %	10,62	12,07	14,66	20,17	24,93	29,25	37,04	50,62	78,76	124,17
+20 %	10,80	12,30	14,98	20,65	25,56	30,00	38,02	51,99	80,92	127,60
+30 %	11,08	12,66	15,47	21,41	26,54	31,18	39,56	54,13	84,30	132,93

Tab. 4: Die kostenäquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\frac{\pi_2}{\pi_1}$, wenn die Fahrgeschwindigkeit um 100 $\alpha\%$ von der optimalen Fahrgeschwindigkeit abweicht. Dabei ist zu beachten, daß z.B. $\alpha = -0,20$ und $100 \alpha\% = -20\%$ dasselbe sind.

Die Werte in Tab. 4 werden in der gleichen Weise wie die Werte der Tab. 3 aus Gleichung (17) errechnet. Es wird dabei lediglich an die Stelle der optimalen Fahrgeschwindigkeit die tatsächlich eingehaltene Fahrgeschwindigkeit eingesetzt, die gleich $x_{opt} \cdot (1+\alpha)$ ist. Auch in Tab. 4 stehen dabei nicht Kosten beträge, sondern die "kostenäquivalenten Kraftstoffmengen", die sich ergeben, wenn man die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer zum gegebenen Kraftstoffpreis in die ihnen äquivalenten Kraftstoffmengen umrechnet.

Sowohl Tab. 4 für sich allein, als auch insbesondere ein Vergleich der Tab. 4 mit der Tab. 3 zeigt, daß die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer relativ wenig auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit reagieren.¹⁾ Beträgt z.B. das Verhältnis zwischen Zeitlohn und Kraftstoffpreis 10:1, dann steigt der in Tab. 3 für diesen Fall wiedergegebene Wert von 20 l/100 km, wenn $\alpha = +10\%$ ist, auf 20,171, bzw. wenn $\alpha = -10\%$ ist, auf 20,191 an. Für den verhältnismäßig hohen Wert von $\alpha = +30\%$ erhält man nach Tab. 4 den Wert 21,412 l/100 km, bzw. für $\alpha = -30\%$ den Wert 22,006 l/100 km.

Die Ergebnisse der Tab. 4 legen es nahe, den Sachverhalt noch etwas anders darzustellen, und zwar in der Weise, daß vorgegebenen prozentualen Abweichungen von der als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeit, die durch sie verursachten prozentualen Steigerungen der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer (statt der in Tab. 4 wiedergegebenen absoluten Werte) gegenübergestellt werden.

Diese prozentualen Kostensteigerungen stellen Proportionalitätsabweichungen²⁾ dar und zeigen, welche kostenmäßigen

1) Zum besseren Vergleich sind die Werte der Tab. 3 in Tab. 4 ebenfalls wiedergegeben, sie stehen in der Zeile für $\alpha = 0\%$.

2) Zum Begriff der Proportionalitätsabweichung vgl. L. Pack, Die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 30, 55 ff. und 539 ff. Die Proportionalitätsabweichung ist definiert durch $k_e(x_2):k_e(x_1)-1$. Für proportionale Kosten sind die Stückkosten konstant und deshalb die Proportionalitätsabweichung gleich Null. Infolgedessen ist ein von Null verschiedener Wert ein Maß für die Proportionalitätsabweichung.

Konsequenzen bestimmte prozentuale Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit zur Folge haben. Dabei ist die Proportionalitätsabweichung $p(\alpha)$ in Verbindung mit (17) definiert durch ¹⁾:

$$p(\alpha) = \frac{k_e^2[x_{opt}(1\pm\alpha)] - k_e^2(x_{opt})}{k_e^2(x_{opt})}$$

$$= \frac{k_e[x_{opt}(1\pm\alpha)]}{k_e(x_{opt})} - 1 = \frac{k_e[x_{opt}(1\pm\alpha)] : \pi_1}{k_e(x_{opt}) : \pi_1} - 1 \quad 2)$$

Im hier verwandten Zahlenbeispiel gilt also in Verbindung mit (17)

$$(19) \quad p(\alpha) = \frac{\frac{1}{100} \left\{ \frac{1}{1250} [(1+\alpha) \cdot x_{opt}]^2 - \frac{3}{50} (1+\alpha) \cdot x_{opt} + 8 \right\} + \frac{\pi_2}{\pi_1 (1+\alpha) x_{opt}}}{\frac{1}{100} \left(\frac{1}{1250} x_{opt}^2 - \frac{3}{50} x_{opt} + 8 \right) + \frac{\pi_2}{\pi_1 \cdot x_{opt}}} - 1$$

Die im vorliegenden Fall für $p(\alpha)$ sich ergebenden Werte sind auf der folgenden Seite in Tab. 5 dargestellt.

¹⁾ Man kann hier die Frage stellen, ob im Zähler und Nenner von $p(\alpha)$ nicht eigentlich die gesamten Kosten pro gefahrenen Kilometer stehen müßten. Da diese auch die fixen Kosten pro Kilometer enthalten, würde man dann für $p(\alpha)$ Werte erhalten, die niedriger sind als die hier errechneten, vermutlich sogar wesentlich niedriger.

²⁾ Aus dieser Zeile geht klar hervor, daß $p(\alpha)$ unabhängig ist von der beim Übergang von Tab. 1 zu den folgenden Tabellen vorgenommenen Division der Kosten durch den Kraftstoffpreis π_1 . Da π_1 im Zähler und im Nenner des $p(\alpha)$ definierenden Ausdrucks vorkommt, ist $p(\alpha)$ davon, daß $k_e(x)$ durch π_1 dividiert wird, unabhängig.

$\frac{\pi_2}{\pi_1} \left[\frac{1}{\text{Std}} \right]$	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	100:1	200:1
$\alpha = -30 \%$	6.67	7.60	8.73	10.03	10.62	10.97	11.36	11.69	11.95	12.05
-20%	2.76	3.13	3.58	4.10	4.34	4.47	4.62	4.75	4.85	4.88
-10%	0.65	0.74	0.84	0.96	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.13
$+10 \%$	0.59	0.67	0.75	0.85	0.90	0.92	0.95	0.97	0.99	0.99
$+20 \%$	2.28	2.56	2.89	3.27	3.43	3.53	3.63	3.71	3.77	3.78
$+30 \%$	4.97	5.56	6.27	7.06	7.41	7.61	7.82	7.99	8.10	8.11

Tab. 5: Die durch eine gegebene prozentuale Unterschreitung ($-\alpha$) bzw. Überschreitung ($+\alpha$) der als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeit verursachte prozentuale Steigerung der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer ($p(\alpha)$ in Prozent der letzteren) in Abhängigkeit von der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\frac{\pi_2}{\pi_1} \left[\frac{1}{\text{Std}} \right]$ bei Zeitlohn

Tab. 5 zeigt den zuvor anhand von Tab. 4 bereits beschriebenen Sachverhalt noch klarer auf. Für das betrachtete Verhältnis von 10:1 zwischen Stundenlohn und Kraftstoffpreis weist Tab. 5 z.B. für $\alpha = +10\%$ eine prozentuale Kostensteigerung von 0,85 %, für $\alpha = -10\%$ von 0,96 % auf; für den relativ hohen Wert von $\alpha = +30\%$ beträgt die prozentuale Kostensteigerung 7,06 %, für $\alpha = -30\%$ ist sie 10,03 %.

b) Die vorgegebenen prozentualen Steigerungen der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer entsprechen den höchstzulässigen Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit

Zur Abrundung der Darstellung bietet sich nun an, die Fragestellungen der Tab. 4 u. 5 umzukehren. Anstelle von Tab. 5 wird dann berechnet, um wieviel Prozent man von der als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeit abweichen kann, ohne eine vorgegebene, höchstens zugelassene prozentuale Kostensteigerung zu überschreiten. Die entsprechenden Prozentwerte werden in Tab. 7 wiedergegeben. Statt der Tab. 4 wird Tab. 6 errechnet, aus der entnommen werden kann, welche Fahrgeschwindigkeit zu einer vorgegebenen prozentualen Steigerung der minimalen variablen Kosten pro gefahrenen Kilometer führt.

Für die Berechnung der Tab. 6 u. 7 wird von der für $p(\alpha)$ geltenden Definitionsgleichung (19) ausgegangen. Dabei kann im vorliegenden Fall p an die Stelle von $p(\alpha)$ gesetzt werden, weil p zur Berechnung der Werte in den Tab. 6 u. 7 mit einem bestimmten Wert vorgegeben ist, z.B. mit 2 %. Es ist diejenige Fahrgeschwindigkeit

$$x = (1 + \alpha) \cdot x_{\text{opt}}$$

zu bestimmen, für welche die Definitionsgleichung (19) bei vorgegebenem p und vorgegebenem x_{opt} erfüllt ist, für die also gilt

$$p = \frac{k_e^2(x) : \pi_1}{k_e^2(x_{\text{opt}}) : \pi_1} - 1,$$

woraus folgt:

$$(20) \quad (1+p) \cdot k_e(x_{\text{opt}}) : \pi_1 = k_e^2(x) : \pi_1 \quad \text{bzw.} \quad (1+p)k_e^2(x_{\text{opt}}) = k_e(x)$$

In Analogie zu (17) gilt für das Zahlenbeispiel:

$$\frac{k_e^2(x)}{\pi_1} = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{1250} x^2 - \frac{3}{50} x + 8 \right) + \frac{\pi_2}{\pi_1 \cdot x}$$

Beachtet man nun, daß unter den hier geltenden Bedingungen die linke Seite der Gleichung (20), weil p und x_{opt} fest vorgegeben sind, eine Konstante darstellt, so erhält man als Gleichung, aus der die gesuchte Fahrgeschwindigkeit x bestimmt werden kann:

$$(21) \quad \frac{1}{100 \cdot 1250} x^3 - \frac{3}{100 \cdot 50} x^2 + \left[\frac{8}{100} - (1+p) \cdot \frac{k_e^2(x_{opt})}{\pi_1} \right] x + \frac{\pi_2}{\pi_1} = 0$$

Dabei gehören zu jedem p zwei Werte von x . Die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer steigen nämlich sowohl beim Überschreiten als auch beim Unterschreiten der optimalen Fahrgeschwindigkeit an. Der entsprechende Sachverhalt ist in Abb. 8 wiedergegeben.

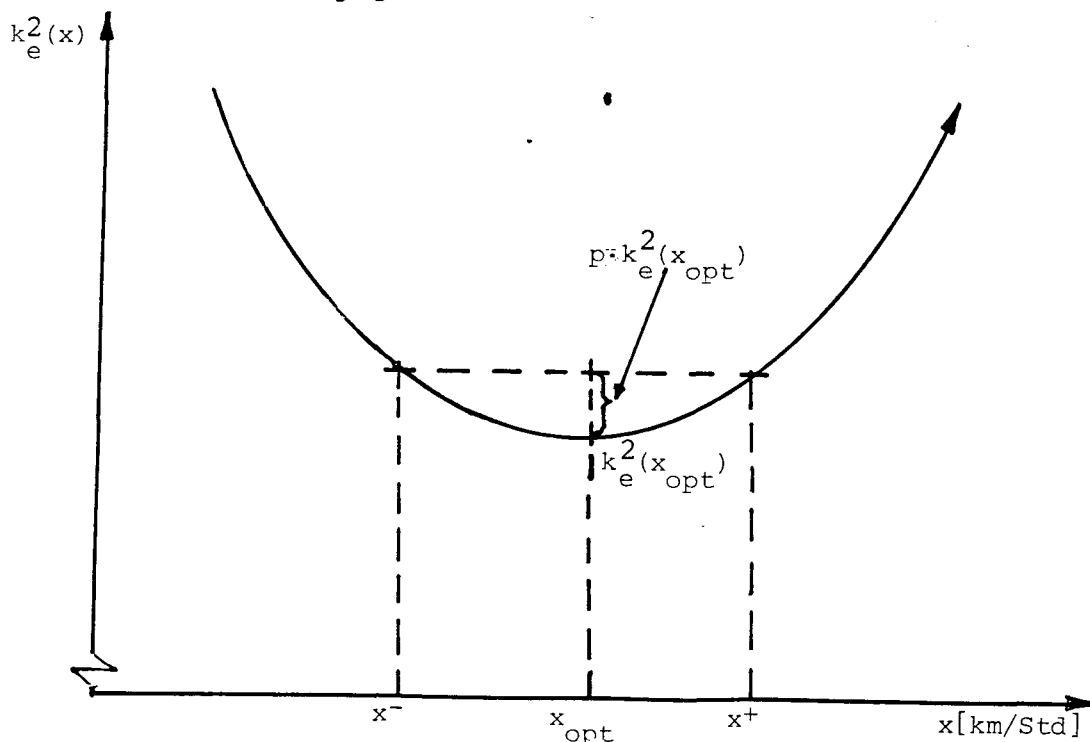


Abb. 8: Graphische Bestimmung der Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit, die höchstens zulässig sind, wenn eine vorgegebene Steigerung der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten von 100p% nicht überschritten werden darf.

Die Fahrgeschwindigkeit, welche kleiner als x_{opt} ist, wird mit x^- , die x_{opt} überschreitende mit x^+ bezeichnet. Die entsprechenden Werte sind auf der folgenden Seite in Tab. 6 wiedergegeben.

Nach der Bestimmung der gesuchten x-Werte ist nur noch zu beachten, daß definiert wurde $x = (1+\alpha) \cdot x_{opt}$, woraus folgt:

$$(21) \quad \alpha = \frac{x}{x_{opt}} - 1$$

Die unter Berücksichtigung von (21) aus Tab. 6 sich ergebenden Werte von α können auf der nächsten Seite aus Tab. 7 entnommen werden. Dabei gehört α^+ zu x^+ und α^- zu x^- , und ein Motor ist umso elastischer, je größer α für vorgegebenes p ist.

Die Ergebnisse der Tab. 6 und 7 bestätigen sehr deutlich den durch Tab. 5 bereits aufgezeigten Zusammenhang. Wenn z.B. das Verhältnis zwischen Stundenlohn und Kraftstoffpreis gleich 10:1 ist, kann die optimale Fahrgeschwindigkeit um bis zu 10,22 % bzw. um 10,22 km/h überschritten sowie um bis zu 10,84 % bzw. um 10,84 km/h unterschritten werden, ohne daß die variablen Kosten pro gefahrenen Kilometer um mehr als 1 % steigen. Ist eine prozentuale Kostensteigerung von 4 % (8 %) zugelassen, kann die optimale Fahrgeschwindigkeit sogar um bis zu 19,77 % (27,14 %) überschritten, bzw. um bis zu 22,24 % (32,05 %) unterschritten werden, ohne daß die vorgegebene, höchstzulässige prozentuale Kostensteigerung von 4 % (8 %) überschritten wird.

Tab.: 6 Fahrgeschwindigkeiten, welche nicht unterschritten (x^-) bzw. nicht ueberschritten (x^+) werden duerfen, wenn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer von 100 p % bei Zeitlohn nicht ueberschritten werden darf,

bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von $\pi_2 : \pi_1$ gleich

p	2 : 1		3 : 1		5 : 1		10 : 1		15 : 1		20 : 1		30 : 1		50 : 1		100 : 1		200 : 1	
	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+
1%	58.0	74.8	64.4	81.8	73.9	92.5	89.8	110.8	100.9	123.9	109.8	134.5	123.9	151.2	144.6	176.0	178.9	217.4	222.1	269.9
2%	54.7	78.5	61.1	85.7	70.3	96.6	85.7	115.5	96.5	129.0	105.1	139.9	118.7	157.3	138.5	183.0	171.5	226.0	213.0	280.5
4%	50.4	83.8	56.5	91.2	65.5	102.6	80.2	122.2	90.5	136.4	98.7	147.8	111.5	166.0	130.3	193.1	161.4	238.4	200.5	295.8
8%	44.6	91.6	50.5	99.3	59.0	111.2	72.9	132.1	82.4	147.1	90.0	159.3	101.9	178.8	119.3	207.8	147.9	256.5	183.9	318.3

Tab.: 7 Prozentuale Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit, welche hoechstens zulaessig sind, wenn bei Zeitlohn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer nicht ueberschritten werden soll. Dabei gibt α^+ die hoechstzulaessige Ueberschreitung, α^- die hoechstzulaessige Unterschreitung der optimalen Fahrgeschwindigkeit in Prozent der letzteren an.

bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von $\pi_2 : \pi_1$ gleich

p	2 : 1		3 : 1		5 : 1		10 : 1		15 : 1		20 : 1		30 : 1		50 : 1		100 : 1		200 : 1	
	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+
1%	-12.3	13.1	-11.6	12.3	-10.9	11.6	-10.2	10.8	-10.0	10.6	-9.8	10.4	-9.7	10.3	-9.5	10.1	-9.5	10.0	-9.4	10.0
2%	-17.2	18.7	-16.2	17.6	-15.2	16.5	-14.3	15.5	-13.9	15.1	-13.7	14.9	-13.5	14.7	-13.3	14.5	-13.2	14.4	-13.2	14.3
4%	-23.8	26.8	-22.4	25.2	-21.1	23.7	-19.8	22.2	-19.3	21.7	-19.0	21.4	-18.7	21.1	-18.5	20.8	-18.3	20.6	-18.2	20.6
8%	-32.5	38.6	-30.7	36.3	-28.9	34.1	-27.1	32.1	-26.5	31.2	-26.1	30.8	-25.7	30.4	-25.4	30.0	-25.1	29.8	-25.0	29.8

Kapitel 4: Praktische Anwendung der gewonnenen theoretischen Erkenntnisse auf den Zwei-Faktoren-Fall

Im Anschluß an die vorausgegangenen Überlegungen ist es natürlich naheliegend, eine praktische Untersuchung auf der Basis von empirischem Zahlenmaterial durchzuführen. Dazu werden im folgenden die am meisten verkauften Personenkraftwagen aller großen deutschen Automobilfabriken herangezogen.

Verwandt werden Daten der in den Jahren 1982 bzw. 1983 gebauten Wagen, welche die einzelnen Firmen zur Verfügung gestellt haben; dafür sei an dieser Stelle ein besonderes Wort des Dankes gesagt. Sind nicht genügend numerische Werte angegeben worden, wurde auf die zusätzlich gelieferten Verbrauchskurven zurückgegriffen; solche aus Kurven abgelesene Werte sind in Klammern gesetzt. Die Daten, von denen ausgegangen wurde, sind in Tab. 8a wiedergegeben. Aus diesen Daten konnten für die Funktionen des spezifischen Kraftstoffverbrauchs von der Form

$$r_1(x) = ax^2 + bx + c \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$$

die in der Tab. 8b wiedergegebenen Parameterwerte errechnet werden.¹⁾ Diese Parameter gelten für ein Fahren mit Teillast im vierten Gang (sogenannter Teillastverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit).

Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, sei nochmals an die vereinfachenden Bedingungen erinnert, unter denen die vorliegende Untersuchung durchgeführt wird. Wegen der angestellten statischen Betrachtungsweise²⁾ bleiben vor allem Anfahr-, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge unbeachtet. Als entscheidungsrelevant werden nur die Kraftstoff- und die Lohnkosten berücksichtigt³⁾. Die im folgenden betrachteten Fahrzeuge sind also nur unter den zuvor genannten Bedingungen vergleichbar. Entsprechend sind die in den nachfolgenden Tabellen errechneten Werte zu interpretieren.⁴⁾

1) Bei der Berechnung dieser Parameterwerte aus den Unterlagen, welche die Firmen zur Verfügung gestellt hatten, hat Herr Dr. H.-J. Vaterrodt, Universität Mannheim, wertvolle Hilfe geleistet, dem an dieser Stelle herzlich gedankt wird.

2) Vgl. S. 11

3) Vgl. S. 29

4) Bei der Berechnung der Tab. 9 bis 15 hat Herr Dipl.-Volkswirt R. Macha den Verf. wirkungsvoll unterstützt, wofür ihm ein besonderes Wort des Dankes gesagt sei.

		F a h r g e s c h w i n d i g k e i t (km/Std)														
Kfz-Marke und Typ		50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Dieselfahrzeuge	Audi 80 D		3,2		3,9	4,4	5,0		6,5	7,5						
	" 100 D		3,8		4,6	5,0	5,6		7,1		9,4	10,9				
	DB 200 D		(5,2)		(6,5)		(8,4)		(11,2)	(12,8)						
	" 240 D		(5,2)		(6,5)		(8,4)		(11,2)	(12,4)	(15,4)					
	" 300 D		(5,8)		(7,2)		(9,0)		(11,2)		(14,8)	(16)				
	Kadett 16 D	3,5	3,8	4,2	4,6		5,8	6,5			8,2	9,5	10,3			
	Golf Diesel	(3,4)	(3,7)	(4,2)	(4,6)	5,2	(5,8)	(6,6)		7,5	(8,8)	(10,8)				
Passat D Variant	(3,9)	(4,0)	(4,4)	(4,8)	5,3	(5,9)	(6,7)		7,6	(9,2)	(11,5)					
Benzinfahrzeuge	Audi 80 (55 kW)		4,6		5,6	6,1	6,7		8,3		10,7	12,2				
	Audi 100 (74 kW)		4,8		5,5	5,9	6,4		7,6		9,1	11,4				
	BMW 316 ECE		(5,4)	(5,8)	(6,2)	(6,8)	(7,4)	(8,2)	(9,2)	(10,2)	(11,4)	(13,0)	(15,0)			
	" 318 i		(5,6)	(5,9)	(6,3)	(6,9)	(7,6)	(8,2)	(9,2)	(10,0)	(11,0)	(12,2)	(13,8)	(15,4)		
	" 520 i		(6,2)	(6,4)	(7,0)	(7,6)	(8,1)	(8,8)	(9,5)	(10,6)	(11,8)	(13,0)	(14,2)	(15,8)	(17,0)	
	DB 200		(5,3)		(5,8)		(9,0)		(10,8)		(13,0)		(16,2)			
	" 230 E		(6,0)		(7,6)		(9,0)		(10,8)		(12,8)		(16,0)		(21,0)	
	" 250		(7,0)		(8,7)		(10,0)		(12,0)		(14,6)		(17,5)		(22,0)	
	" 280 S		(7,5)		(8,7)		(9,8)		(11,2)		(13,7)		(16,0)		(19,0)	(25,0)
	" 280 SE		(7,2)		(8,3)		(9,8)		(11,0)		(13,5)		(16,0)		(19,0)	(23,0)
	Escort 1,1 HC Sedan	4,0		4,7		5,7				7,8		10,2				
	" 1,3 " "	4,8		5,5		6,0				7,8		10,3				
	" 1,6 " "	4,9		5,3		6,4				8,2		9,7		12,2		
	" " " XR-3	5,3		6,0		6,9				8,9		11,2		13,8		
	Ascona C 16 SH	4,6	4,7	5,0	5,4		6,7	7,5			9,2	10,4	12,0	13,9		
	Kadett 13 S	4,3	4,4	4,7	5,2		6,3	7,0			8,7	9,9	11,4	14,0		
	Rekord 20 E	5,5	5,6	5,9	6,3		7,5	8,3			9,9	10,9	12,3	13,8		
VW Polo	(4,2)	(4,5)	(4,9)	(5,3)	5,8	(6,3)	(7,0)		7,9	(9,3)						
" Golf	(4,6)	(4,8)	(5,3)	(5,8)	6,4	(7,1)	(7,9)		8,8	(10,4)						
" Passat Variant	(5,3)	(5,4)	(5,7)	(6,2)	6,8	(7,5)	(8,3)		9,2	(10,4)	(11,8)	(13,5)				

Tab. 8a: Firmenangaben über den Teillastverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit, in l/100 km

	Kfz-Marke und Typ	Koeffizienten der Funktion $r_1(x)$		
Dieselfahrzeuge	Audi 80 D	a = 0.000538	b = 0.041385	c = 3.753087
	Audi 100 D	a = 0.000691	b = 0.068509	c = 5.517916
	DB 200 D	a = 0.000922	b = 0.066589	c = 5.889162
	DB 240 D	a = 0.001171	b = 0.112962	c = 7.877500
	DB 300 D	a = 0.000721	b = 0.036518	c = 5.424785
	Kadett 16 D	a = 0.000462	b = 0.023642	c = 3.546595
	Golf Diesel	a = 0.000593	b = 0.039428	c = 3.860620
	Passat D Variant	a = 0.000834	b = 0.086585	c = 6.212987
Benzinfahrzeuge	Audi 80 (55 KW)	a = 0.000643	b = 0.053003	c = 5.573668
	Audi 100 (74 KW)	a = 0.000457	b = 0.036417	c = 5.419066
	BMW 316	a = 0.000790	b = 0.082027	c = 7.634934
	BMW 318 i	a = 0.000605	b = 0.052155	c = 6.615338
	BMW 520 i	a = 0.000548	b = 0.040419	c = 6.646319
	DB 200	a = 0.000551	b = 0.021796	c = 5.119688
	DB 230 E	a = 0.000909	b = 0.107201	c = 10.253953
	DB 250	a = 0.001059	b = 0.146044	c = 13.621990
	DB 280 S	a = 0.000854	b = 0.107294	c = 11.555774
	DB 280 SE	a = 0.000592	b = 0.045604	c = 6.217701
	Escort 1.1 HC Sedan	a = 0.000560	b = 0.039195	c = 4.620724
	Escort 1.3 HC Sedan	a = 0.000650	b = 0.066386	c = 6.669456
	Escort 1.6 HC Sedan	a = 0.000463	b = 0.032093	c = 5.361064
	Escort 1.6 HC XR-3	a = 0.000558	b = 0.041648	c = 6.064363
	Ascona C 16 SH	a = 0.000735	b = 0.072803	c = 6.469040
	Kadett 13 S	a = 0.000782	b = 0.084265	c = 6.796960
	Rekord 20 E	a = 0.000596	b = 0.041047	c = 6.561290
	VW Polo	a = 0.000482	b = 0.028715	c = 4.456738
	Golf	a = 0.000538	b = 0.029826	c = 4.704813
	Passat Variant	a = 0.000722	b = 0.065739	c = 6.795533

Tab. 8b: Aus Tab. 8a errechnete Koeffizienten der Verbrauchsfunktion $r_1(x)$ [l/100 km]

I. Die optimale Fahrgeschwindigkeit

In Tab. 9 (die Tab. 1 entspricht) wird die Abhängigkeit der optimalen Fahrgeschwindigkeit vom Kraftstoffpreis und vom Lohnsatz beispielhaft für den Audi 80 mit einem Motor von 55 kW und den Audi 80 Diesel dargestellt.

Derselbe Sachverhalt wird in Tab. 10 für alle untersuchten Pkw-Typen wiedergegeben. Dabei ist in Tab. 10 lediglich - in Analogie zum Übergang von Tab. 1 zu Tab. 2 - die isolierte Angabe von Kraftstoffpreis und Lohnsatz durch den Quotienten aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis ersetzt. Auf diese Weise kann Tab. 9 in Tab. 10 für jeden Wagen auf eine einzige Zeile reduziert werden. Daß Tab. 10 dieselben Werte liefert wie Tab. 9, zeigt sich bezüglich des Audi 80 Diesel z.B. für einen Lohnsatz von 15,- DM/Std. und einen Kraftstoffpreis von 1,50 DM/l, was einem Quotienten aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis von 10:1 entspricht; sowohl Tab. 9 als auch Tab. 10 zeigen hierfür eine optimale Fahrgeschwindigkeit von 112,24km/Std.

Aus den Tab. 9 und 10 kann klar ersehen werden, daß die optimale Fahrgeschwindigkeit mit steigendem Quotienten aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis erheblich zunimmt. Anders formuliert: Je niedriger bei gegebenem Kraftstoffpreis der Lohnsatz, desto niedriger ist die optimale Fahrgeschwindigkeit.

Tab.:9 Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis π_1 und vom Stundenlohnsatz π_2 bei Zeitlohn.

Wagentyp: Audi 80 (55 KW) Höchstgeschwindigkeit = 160 Km

Lohn- satz π_2 [DM/Std]	Kraftstoffpreis π_1 in DM / l													
	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	2.00	2.20	2.50	3.00
3	75.41	74.68	73.99	73.34	72.72	72.13	71.57	70.53	69.57	68.69	67.11	65.75	64.00	61.66
5	85.52	84.64	83.80	83.01	82.26	81.54	80.86	79.58	78.41	77.33	75.41	73.73	71.57	68.69
10	102.68	101.55	100.47	99.45	98.48	97.56	96.68	95.03	93.52	92.12	89.62	87.44	84.64	80.86
15	114.87	113.57	112.33	111.15	110.03	108.97	107.95	106.04	104.29	102.68	99.79	97.26	94.01	89.62
20	124.64	123.19	121.82	120.52	119.29	118.11	116.98	114.87	112.94	111.15	107.95	105.15	101.55	96.68
25	132.92	131.35	129.87	128.47	127.13	125.86	124.64	122.36	120.27	118.34	114.87	111.85	107.95	102.68
30	140.17	138.50	136.93	135.43	134.01	132.65	131.35	128.93	126.70	124.64	120.95	117.73	113.57	107.95
40	152.57	150.73	148.99	147.34	145.77	144.27	142.84	140.17	137.70	135.43	131.35	127.79	123.19	116.98
50	163.1*	161.1*	159.21	157.43	155.73	154.11	152.57	149.68	147.02	144.57	140.17	136.32	131.35	124.64
70	180.5*	178.3*	176.2*	174.2*	172.3*	170.4*	168.7*	165.5*	162.5*	159.73	154.80	150.48	144.91	137.37
100	201.2*	198.7*	196.4*	194.1*	192.0*	189.9*	188.0*	184.3*	180.9*	177.8*	172.3*	167.4*	161.1*	152.57
150	228.1*	225.2*	222.5*	219.9*	217.4*	215.1*	212.9*	208.7*	204.8*	201.2*	194.3*	189.2*	182.0*	172.3*
200	249.5*	246.3*	243.3*	240.5*	237.7*	235.2*	232.7*	228.1*	223.8*	219.9*	212.9*	206.7*	198.7*	188.0*

Wagentyp: Audi 80 D Höchstgeschwindigkeit = 144 Km

Lohn- satz π_2 [DM/Std]	Kraftstoffpreis π_1 in DM / l													
	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	2.00	2.20	2.50	3.00
3	77.32	76.54	75.79	75.09	74.42	73.78	73.17	72.04	71.00	70.04	68.32	66.83	64.92	62.36
5	88.22	87.27	86.37	85.52	84.71	83.94	83.21	81.83	80.57	79.41	77.32	75.51	73.17	70.04
10	106.61	105.39	104.25	103.16	102.12	101.13	100.19	98.42	96.80	95.31	92.62	90.29	87.27	83.21
15	119.63	118.24	116.91	115.66	114.46	113.32	112.24	110.20	108.33	106.61	103.51	100.81	97.33	92.62
20	130.05	128.51	127.05	125.66	124.34	123.08	121.88	119.63	117.57	115.66	112.24	109.25	105.39	100.19
25	138.87	137.20	135.63	134.13	132.70	131.34	130.05	127.62	125.39	123.33	119.63	116.40	112.24	106.61
30	146.6*	144.8*	143.14	141.54	140.03	138.58	137.20	134.52	132.24	130.05	126.11	122.67	118.24	112.24
40	159.3*	157.8*	156.0*	154.2*	152.6*	151.0*	149.4*	146.3*	143.97	141.54	137.20	133.41	128.51	121.88
50	171.0*	168.9*	166.9*	165.0*	163.2*	161.4*	159.8*	156.7*	153.9*	151.3*	146.6*	142.49	137.20	130.05
70	189.5*	187.1*	184.9*	182.8*	180.7*	178.8*	177.0*	173.5*	170.3*	167.4*	162.2*	157.6*	151.6*	143.61
100	211.5*	208.9*	206.4*	204.0*	201.7*	199.5*	197.4*	193.5*	190.0*	186.7*	180.7*	175.5*	168.9*	159.8*
150	240.1*	237.0*	234.1*	231.4*	228.8*	226.3*	223.9*	219.4*	215.3*	211.5*	204.7*	198.8*	191.1*	180.7*
200	262.8*	259.4*	256.2*	253.2*	250.3*	247.6*	245.0*	240.1*	235.5*	231.4*	223.9*	217.3*	208.9*	197.4*

Tab.: 10

Optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} in Abhängigkeit von der stundenlohnaequivalenten Kraftstoffmenge

Fahrzeug MARKE u. TYP	bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von $\pi_2:\pi_1$ gleich									Xmax
	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	75:1	
Audi 80 D	73.17	80.98	92.62	112.24	126.11	137.20	154.80*	180.73*	204.74*	144
Audi 100 D	75.18	81.92	92.16	109.70	122.23	132.28	148.29	171.94*	193.91*	156
DB 200 D	68.13	74.34	83.77	99.88	111.37	120.59	135.27*	156.95*	177.07*	135
DB 240 D	76.68	80.97	87.90	100.46	109.76	117.34	129.57	147.85*	164.97*	143
DB 300 D	74.84	79.93	87.93	102.08	112.39	120.73	134.11	154.01	172.56*	155
Kadett 16 D	69.89	78.40	90.97	111.95	126.71	138.47	157.11*	184.52*	209.87*	143
Golf Diesel	68.83	76.48	87.86	106.95	120.44	131.20	148.28*	173.42*	196.70*	144
Passat D Variant	73.88	80.01	89.41	105.64	117.28	126.66	141.60*	163.73*	184.29*	140
Audi 80 (55 KW)	71.57	78.79	89.62	107.95	120.95	131.35	147.88	172.25*	194.84*	160
Audi 100 (74 KW)	76.87	85.13	97.45	118.18	132.84	144.56	163.15	190.53*	215.89*	176
BMW 316	74.64	80.92	90.53	107.10	118.98	128.53	143.77	166.32	187.27*	175
BMW 318 i	73.61	80.94	91.96	110.63	123.88	134.49	151.35	176.20	199.24*	184
BMW 520 i	72.04	79.83	91.44	110.97	124.78	135.81	153.32	179.10	202.98*	185
DB 200	64.04	72.12	84.03	103.86	117.83	128.94	146.54	172.41*	196.34*	168
DB 230 E	77.35	82.95	91.68	107.01	118.11	127.08	141.45	162.77	182.64*	180
DB 250	82.75	87.47	95.07	108.82	118.98	127.26	140.60	160.54	179.21	185
DB 280 S	80.77	86.37	95.15	110.64	121.91	131.03	145.63	167.35	187.59	200
DB 280 SE	71.53	79.06	90.30	109.26	122.69	133.42	150.45	175.55	198.80	210
Escort 1.1 HC Sedan	70.71	78.48	90.05	109.48	123.21	134.18	151.58*	177.19*	200.90*	147
Escort 1.3 HC Sedan	77.01	83.87	94.31	112.19	124.96	135.21	151.55	175.68*	198.09*	157
Escort 1.6 HC Sedan	74.05	82.39	94.77	115.55	130.21	141.91	160.47	187.78*	213.07*	167
Escort 1.6 HC XR-3	71.94	79.67	91.19	110.59	124.31	135.27	152.66	178.28	202.01*	182
Ascona C 16 SH	74.22	80.79	90.79	107.93	120.18	130.01	145.68	168.84	190.34*	170
Kadett 13 S	76.01	82.24	91.81	108.35	120.23	129.79	145.05	167.64*	188.64*	162
Rekord 20 E	69.34	76.94	88.27	107.30	120.75	131.49	148.52	173.61	196.83*	187
VW Polo	70.97	79.29	91.60	112.20	126.71	138.28*	156.63*	183.62*	208.59*	135
Golf	67.96	76.00	87.88	107.76	121.76	132.92	150.62*	176.64*	200.72*	138
Passat Variant	72.14	78.90	89.12	106.54	118.95	128.89	144.72	168.08*	189.76*	160

Bei der Berechnung von Tab. 9 und 10 kommt es häufig vor, daß die als optimal errechnete Fahrgeschwindigkeit höher ist als die Höchstgeschwindigkeit eines Wagens. In diesem Fall hat die angegebene Fahrgeschwindigkeit nur rein theoretische Bedeutung, was durch einen Stern (*) gekennzeichnet wird. In Tab. 9 ergeben sich beim Audi 80 D für Lohnsätze ab 50,- DM/Std., beim Audi 80 für Lohnsätze ab 100,- DM/Std. "optimale" Fahrgeschwindigkeiten, die nicht mehr realisierbar sind. Tab. 10 zeigt, daß dann, wenn der Quotient aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis gleich 75 ist, nur noch zwei Wagen (der DB 280 S und der DB 280 SE) realisierbare optimale Fahrgeschwindigkeiten aufweisen. Schon für einen Quotienten von 80:1 liegt auch bei diesen beiden Wagen die "optimale" Fahrgeschwindigkeit über der maximalen. Dabei ist zu beachten, daß bei heutigen Preisen (Frühjahr 1983) ein Wagen, der mit zwei Handwerkern besetzt zu einer Reparaturarbeit fährt, bereits einen Quotienten aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis von 50:1 übersteigt, also einen Quotienten, für den die als optimal berechnete Fahrgeschwindigkeit nur noch bei sehr wenigen der betrachteten Wagen tatsächlich realisierbar ist.

Aus den vorgenannten Gründen sind in Tab. 10 Quotienten, die höher als 75:1 sind, weggelassen worden. Wenn in Tab. 9 Lohnsätze von mehr als 100,- DM/Std. aufgeführt sind, dann nur, um zu zeigen, welche extrem hohen fiktiven optimalen Fahrgeschwindigkeiten ihnen theoretisch entsprechen würden, wenn es keine Höchstgeschwindigkeit gäbe bzw. wenn die Funktion, welche die Kurve des spezifischen Kraftstoffverbrauchs definiert, auch für Geschwindigkeiten gelten würde, die höher sind als die praktisch erreichbare Höchstgeschwindigkeit.

II. Die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer

In Tab. 11 werden die Kraftstoffmengen (in l/100 km) wiedergegeben, welche den minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrene 100 km äquivalent sind, d.h. also die Kraftstoffmengen, welche mit den pro 100 km minimalen entscheidungsrelevanten Kosten gekauft werden können.

In Tab. 11 sind demzufolge auch keine fixen Kosten berücksichtigt.¹⁾ Es ist darin natürlich auch nicht erfaßt, welchen Fahrkomfort ein Wagen bietet, wie groß die optimale Fahrgeschwindigkeit ist usw.

In Tab. 11 sind die minimalen kostenäquivalenten Kraftstoffmengen von der niedrigsten bis zur höchsten geordnet, und zwar für Diesel- und für Benzinfahrzeuge getrennt (vgl. die in runde Klammern gesetzten Zahlen). Verbrauchswerte, die mit einem Stern (*) gekennzeichnet sind, gehören zu einer als optimal errechneten Fahrgeschwindigkeit, die nicht realisierbar ist, weil sie die maximale Fahrgeschwindigkeit übersteigt. In Tab. 11 sind in diesem Fall die kostenäquivalenten Kraftstoffmengen angegeben, die man erhält, wenn der Wagen mit der Maximalgeschwindigkeit fährt.

¹⁾ Fixe Kosten sind im Sinne der hier angestellten Untersuchung nicht entscheidungsrelevant. Das sind sie dagegen sehr wohl, wenn es zu entscheiden gilt, welches Fahrzeug man sich anschaffen will.

Tab.: 11 Die minimale kostenaquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 Km) in Abhaengigkeit von der stundenlohnaequivalenten Kraftstoffmenge bei Zeitlohn

Fahrzeug MARKE u. TYP	bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von $\Pi_2 : \Pi_1$ gleich									
	2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	75:1	
Audi 80 D Audi 100 D	1) 6.34 3) 6.93	1) 7.63 2) 8.20	1) 9.93 2) 10.50	1) 14.80 2) 15.43	1) 18.98 2) 19.74	1) 22.78 3) 23.67	1) 29.78* 3) 30.78	1) 43.67* 2) 43.70*	2) 61.03* 1) 59.72*	
DB 200 D DB 240 D DB 300 D	6) 8.63 7) 8.87 8) 9.50	6) 10.04 7) 10.14 8) 10.79	7) 12.56 6) 12.51 8) 13.17	7) 17.99 6) 17.80 8) 18.42	7) 22.71 6) 22.55 8) 23.08	7) 27.02 6) 26.96 8) 27.36	6) 34.83* 7) 35.05 8) 35.20	8) 49.64* 7) 49.50* 6) 49.05	8) 68.16* 7) 66.99* 6) 65.18*	
Kadett 16 D	4) 7.01	4) 8.36	4) 10.72	3) 15.62	3) 19.81	2) 23.57	2) 30.59*	3) 44.58*	3) 62.06*	
Golf Diesel Passat D Variant	2) 6.86 5) 7.08	3) 8.24 5) 8.37	3) 10.66 5) 10.73	4) 15.78 5) 15.84	4) 20.17 5) 20.32	4) 24.14 5) 24.42	4) 31.31* 5) 31.87*	4) 45.20* 5) 46.15*	4) 62.56* 5) 64.01*	
Audi 80 (55 KW) Audi 100 (74 KW)	5) 7.87 6) 7.92	6) 9.20 5) 9.15	7) 11.57 4) 11.34	8) 16.61 1) 15.96	8) 20.97 1) 19.94	8) 24.93 1) 23.54	8) 32.08 1) 30.03	8) 44.80* 1) 41.57*	12) 60.43* 1) 55.78*	
BMW 316 BMW 318 i BMW 520 i	11) 8.59 13) 8.77 15) 9.35	10) 9.88 13) 10.06 15) 10.67	10) 12.21 12) 12.37 14) 13.00	10) 17.25 11) 17.29 14) 17.92	12) 21.67 10) 21.55 14) 22.16	12) 25.70 10) 25.41 14) 25.99	13) 33.04 10) 32.40 12) 32.90	11) 45.91 6) 44.59 9) 44.90	11) 60.33* 4) 58.26* 5) 58.46*	
DB 200 DB 230 E DB 250 DB 280 S DB 280 SE	14) 9.11 17) 9.99 20) 11.21 19) 10.94 18) 10.78	14) 10.57 17) 11.23 20) 12.38 19) 12.13 18) 12.11	15) 13.13 17) 13.52 20) 14.57 18) 14.33 19) 14.46	16) 18.43 17) 18.54 20) 19.46 18) 19.18 19) 19.45	16) 22.93 17) 22.97 20) 23.84 18) 23.47 19) 23.76	16) 26.98 17) 27.05 20) 27.90 18) 27.42 19) 27.66	16) 34.23 17) 34.49 20) 35.36 18) 34.64 19) 34.70	15) 46.77* 19) 47.61 20) 48.61 18) 47.39 14) 46.94	15) 61.65* 17) 62.08* 18) 63.31 13) 61.46 10) 60.27	
Escort 1.1 HC Sedan Escort 1.3 HC Sedan Escort 1.6 HC Sedan Escort 1.6 HC XR-3	1) 7.48 7) 8.01 9) 8.22 12) 8.74	2) 8.82 7) 9.25 9) 9.50 12) 10.05	2) 11.18 6) 11.49 8) 11.75 13) 12.39	3) 16.18 5) 16.32 7) 16.49 12) 17.33	4) 20.47 5) 20.53 9) 20.55 11) 21.58	4) 24.35 5) 24.37 3) 24.22 11) 25.43	4) 31.37* 3) 31.33 2) 30.83 9) 32.36	10) 44.97* 3) 44.12* 2) 42.85* 4) 44.42	16) 61.98* 9) 60.04* 2) 57.82* 3) 58.18*	
Ascona C 16 SH Kadett 13 S Rekord 20 E	4) 7.81 2) 7.54 16) 9.47	4) 9.10 1) 8.80 16) 10.83	5) 11.42 1) 11.10 16) 13.25	6) 16.44 2) 16.08 15) 18.34	7) 20.82 3) 20.45 15) 22.72	7) 24.81 6) 24.44 15) 26.68	7) 32.05 6) 31.71 15) 33.81	7) 44.74 5) 44.53* 13) 46.20	6) 59.45* 8) 59.97* 7) 59.83*	
Vw Polo (29 KW) Golf (37 KW) Passat Variant	3) 7.66 8) 8.11 10) 8.58	3) 8.99 8) 9.49 11) 9.91	3) 11.33 9) 11.93 11) 12.28	4) 16.22 9) 17.02 13) 17.37	2) 20.40 9) 21.37 13) 21.80	2) 24.18* 9) 25.29 13) 25.83	5) 31.59* 11) 32.57* 14) 33.13	14) 46.40* 17) 47.07* 12) 46.01*	19) 64.92* 20) 65.18* 14) 61.64*	

Tab. 11 zeigt, daß bei den Dieselfahrzeugen der Audi 80 D bis zu einer stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge von 15 den niedrigsten Wert aufweist; für 20 ist es der Kadett 16 D, und für 30 der Audi 100 D; ab 50 weist kein Dieselfahrzeug mehr realisierbare optimale Fahrgeschwindigkeiten auf.

Bei den Benzinfahrzeugen hat für eine stundenlohnäquivalente Kraftstoffmenge von 2 der Ford Escort 1,1 den günstigsten Wert, für 3 bis 5 der Kadett 13 S, für 5 bis 30 der Audi 100, für 50 der Ford Escort HC XR-3 und für 75 der DB 280 SE.¹⁾

III. Wie sensitiv reagieren die entscheidungsrelevanten Kosten auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit?

Im folgenden wird untersucht, wie empfindlich die entscheidungsrelevanten Kosten reagieren, wenn wegen Geschwindigkeitsbeschränkungen, Straßenlage oder aus anderen Gründen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit abgewichen wird. Um die Untersuchung nicht zu umfangreich werden zu lassen, wird darauf verzichtet, den anstehenden Sachverhalt auch noch für den Fall des Umschaltens in einen niedrigeren Gang zu behandeln.

¹⁾ Hier sei nochmals auf folgendes verwiesen, um Mißverständnisse zu vermeiden: Wenn für den DB 280 SE für eine stundenlohnäquivalente Kraftstoffmenge von 75 eine kostenäquivalente Kraftstoffmenge von 60,29 l/100 km ausgewiesen wird, dann heißt das nicht, daß der DB 280 SE 60,29 Liter Benzin auf 100 km verbraucht; es heißt vielmehr nur, daß dann, wenn der Quotient aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis 75:1 ist, die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten des DB 280 SE pro 100 km Fahrstrecke gleich dem Wert von 60,29 Liter Benzin sind. Analog hierzu sind die übrigen Zahlen in Tab. 11 zu interpretieren.

1. Die Reaktion der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit

In Tab. 12 sind (analog zu Tab. 4) die minimalen kostenäquivalenten Kraftstoffmengen pro 100 km angegeben, die man erhält, wenn die optimale Fahrgeschwindigkeit um 10 bzw. 20 bzw. 30 % unterschritten (negative α -Werte) bzw. überschritten wird (positive α -Werte). Zum Vergleich sind auch die minimalen kostenäquivalenten Kraftstoffmengen pro 100 Kilometer selbst angegeben (für $\alpha = 0\%$). Tab. 12 läßt erkennen, daß die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer im untersuchten Bereich sich relativ gesehen wenig ändern.¹⁾

Dieser Sachverhalt tritt noch deutlicher in Tab. 13 hervor, welche (in Analogie zu Tab. 5) angibt, um wieviel Prozent die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer steigen, wenn von der optimalen Fahrgeschwindigkeit um 10 bzw. 20 bzw. 30 % nach oben oder unten abgewichen wird. Tab. 13 zeigt zunächst, daß die prozentuale Kostensteigerung allgemein für Überschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeit niedriger ist als für Unterschreitungen. Ferner: Je elastischer der Motor eines Wagens, um so niedriger seine prozentualen Kostensteigerungen in Tab. 13. Günstige Werte weisen diesbezüglich der DB 280 SE, der DB 250, der Opel Rekord 20 E und der BMW 520 i auf.

In den Tab. 12 und 13 ist gegenüber der Tab. 11 eine wichtige Veränderung in der Behandlung von Geschwindigkeiten vorgenommen worden, welche die Höchstgeschwindigkeit übersteigen. In Tab. 11 wurde die optimale Fahrgeschwindigkeit x_{opt} auch dann ausgedrückt, wenn $x_{opt} > x_{max}$ galt. Der Klarheit halber erhielt x_{opt} dann einen Stern.

Für die Tab. 12 und 13 soll demgegenüber folgendes gelten: Die Abweichungsprozentsätze α werden zwar immer auf x_{opt} angewandt. Die entscheidungsrelevanten Kosten werden jedoch nur

¹⁾ Die Tab. 12-15 werden aus Raumgründen nicht mehr für alle untersuchten Kraftfahrzeugtypen wiedergegeben.

Tab.:12 Die kostenaquivalente Kraftstoffmenge (in l/100 km) in Abhaengigkeit von der stundenlohnaequivalenten Kraftstoffmenge π_2 , π_1 , wenn die Fahrgeschwindigkeit um 100 α % von der optimalen Fahrgeschwindigkeit abweicht und Zeitlohn bezahlt wird,

MARKE u. TYP FAHRZEUG	100 α %	bei einem Vernaeltis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von π_2 , π_1 gleich								
		2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	75:1
DB 240 D	-30%	9.93	11.43	14.19	20.33	25.80	30.84	40.09	56.47 *	74.59 *
	-20%	9.33	10.69	13.22	18.85	23.90	28.56	37.12	52.32 *	69.16 *
	-10%	8.98	10.27	12.68	18.05	22.87	27.33	35.53	50.11 *	66.99**
	0%	8.87	10.14	12.51	17.80	22.55	26.96	35.05	49.50**	"
	10%	8.98	10.27	12.67	18.03	22.84	27.30	35.49	"	"
	20%	9.28	10.62	13.12	18.69	23.67	28.28	35.52 #	"	"
	30%	9.78	11.21	13.85	19.73	24.98	28.53 #	"	"	"
Golf Diesel	-30%	7.49	9.05	11.81	17.59	22.54	27.02	35.06 *	49.00 *	64.15 *
	-20%	7.12	8.57	11.13	16.52	21.13	25.31	32.82 *	45.84 *	62.56**
	-10%	6.92	8.31	10.77	15.95	20.39	24.41	31.64 *	45.20**	"
	0%	6.86	8.24	10.66	15.78	20.17	24.14	31.31**	"	"
	10%	6.92	8.31	10.76	15.93	20.37	24.37 #	"	"	"
	20%	7.07	8.51	11.04	16.36	20.90 #	"	"	"	"
	30%	7.32	8.82	11.47	17.03	"	"	"	"	"
Audi 100 (74 KW)	-30%	8.50	9.91	12.39	17.62	22.12	26.18	33.49	46.18 *	59.98 *
	-20%	8.16	9.46	11.77	16.64	20.82	24.61	31.44	43.29 *	56.19 *
	-10%	7.98	9.23	11.44	16.12	20.14	23.79	30.36	41.77 *	55.78**
	0%	7.92	9.15	11.34	15.96	19.94	23.54	30.03	41.57**	"
	10%	7.97	9.22	11.43	16.10	20.12	23.76	30.21 #	"	"
	20%	8.12	9.40	11.69	16.50	20.64	24.38	"	"	"
	30%	8.35	9.70	12.09	17.12	21.45	24.53 #	"	"	"
BMW 316	-30%	9.33	10.82	13.50	19.26	24.29	28.88	37.19	51.74	67.67 *
	-20%	8.90	10.27	12.74	18.08	22.74	27.00	34.73	48.29	63.14 *
	-10%	8.67	9.97	12.33	17.44	21.92	26.01	33.43	46.46	60.75 *
	0%	8.59	9.88	12.21	17.25	21.67	25.70	33.04	45.91	60.33**
	10%	8.66	9.96	12.32	17.42	21.89	25.98	33.39	46.05 #	"
	20%	8.86	10.21	12.65	17.92	22.53	26.74	34.39	"	"
	30%	9.17	10.60	13.17	18.71	23.55	27.96	34.62 #	"	"
DB 280 SE	-30%	11.41	12.93	15.61	21.27	26.13	30.54	38.47	52.24	67.23
	-20%	11.04	12.44	14.93	20.19	24.73	28.83	36.23	49.09	63.10
	-10%	10.84	12.19	14.57	19.63	23.98	27.93	35.05	47.44	60.93
	0%	10.78	12.11	14.46	19.45	23.76	27.66	34.70	46.94	60.27
	10%	10.84	12.18	14.56	19.61	23.96	27.90	35.01	47.38	60.46 #
	20%	11.00	12.38	14.84	20.04	24.52	28.58	35.90	48.56 #	"
	30%	11.25	12.70	15.28	20.72	25.41	29.65	37.28	"	"
Escort 1.3 HC Sedan	-30%	8.69	10.12	12.69	18.20	22.98	27.34	35.22	48.99 *	64.05 *
	-20%	8.29	9.61	11.99	17.09	21.53	25.58	32.92	45.75 *	60.04**
	-10%	8.08	9.34	11.61	16.50	20.76	24.65	31.70	44.12**	"
	0%	8.01	9.25	11.49	16.32	20.53	24.37	31.33	"	"
	10%	8.07	9.33	11.60	16.48	20.74	24.62	31.38 #	"	"
	20%	8.25	9.55	11.90	16.94	21.33	25.01 #	"	"	"
	30%	8.54	9.91	12.38	17.67	21.82 #	"	"	"	"
Kadett 13 S	-30%	8.29	9.75	12.39	18.09	23.07	27.61	35.85	50.29 *	66.10 *
	-20%	7.85	9.20	11.63	16.91	21.52	25.74	33.40	46.84 *	61.59 *
	-10%	7.62	8.90	11.22	16.27	20.70	24.75	32.10	45.02 *	59.97**
	0%	7.54	8.80	11.10	16.08	20.45	24.44	31.71	44.53**	"
	10%	7.61	8.89	11.21	16.25	20.67	24.71	32.06	"	"
	20%	7.81	9.14	11.54	16.75	21.31	25.48	32.19 #	"	"
	30%	8.13	9.53	12.07	17.54	22.33	26.01 #	"	"	"
Golf (37 KW)	-30%	8.71	10.28	13.03	18.77	23.67	28.08	35.99 *	49.68 *	65.18**
	-20%	8.35	9.81	12.38	17.73	22.30	26.42	33.82 *	47.07**	"
	-10%	8.16	9.57	12.03	17.18	21.59	25.55	32.68 *	"	"
	0%	8.11	9.49	11.93	17.02	21.37	25.29	32.57**	"	"
	10%	8.16	9.56	12.02	17.16	21.56	25.33 #	"	"	"
	20%	8.30	9.75	12.28	17.58	21.70 #	"	"	"	"
	30%	8.53	10.05	12.70	18.08 #	"	"	"	"	"

Tab.:13 Die durch eine gegebene prozentuale Unterschreitung (negatives α) bzw. Ueberschreitung (positives α) der als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeit verursachte prozentuale Steigerung der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer ($p(\alpha)$ in Prozent der letzteren) in Abhaengigkeit von der stundenlohnaequivalenten Kraftstoffmenge Π_2, Π_1 bei Zeitlohn

MARKE u. TYP FAHRZEUG	α	bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von Π_2, Π_1 gleich								
		2:1	3:1	5:1	10:1	15:1	20:1	30:1	50:1	75:1
DB 240 D	-30%	11.94	12.66	13.45	14.17	14.37	14.42	14.39	14.08 *	11.35 *
	-20%	5.09	5.36	5.65	5.90	5.95	5.96	5.92	5.69 *	3.24 *
	-10%	1.23	1.29	1.35	1.40	1.40	1.40	1.39	1.22 *	0.00**
	10%	1.17	1.22	1.26	1.28	1.28	1.27	1.26	0.00**	"
	20%	4.61	4.75	4.90	4.97	4.94	4.90	0.00 #	"	"
	30%	10.19	10.49	10.75	10.85	10.77	0.00 #	"	"	"
Golf Diesel	-30%	9.13	9.91	10.72	11.49	11.78	11.93	11.96 *	8.41 *	2.53 *
	-20%	3.76	4.07	4.38	4.68	4.79	4.85	4.81 *	1.42 *	0.00**
	-10%	0.88	0.95	1.02	1.09	1.11	1.12	1.04 *	0.00**	"
	10%	0.79	0.85	0.91	0.97	0.99	0.00 #	0.00**	"	"
	20%	3.05	3.27	3.50	3.70	0.00 #	"	"	"	"
	30%	6.62	7.09	7.56	7.97	"	"	"	"	"
Audi 100 (74 kW)	-30%	7.29	8.21	9.26	10.42	10.92	11.21	11.52	11.08 *	7.53 *
	-20%	3.01	3.37	3.79	4.25	4.45	4.56	4.68	4.12 *	0.73 *
	-10%	0.71	0.79	0.89	0.99	1.03	1.06	1.09	0.47 *	0.00**
	10%	0.64	0.71	0.79	0.88	0.92	0.94	0.00 #	0.00**	"
	20%	2.46	2.73	3.04	3.37	3.51	3.58	"	"	"
	30%	5.34	5.92	6.58	7.27	7.56	0.00 #	"	"	"
BMW 316	-30%	8.62	9.54	10.59	11.69	12.13	12.35	12.57	12.70	12.17 *
	-20%	3.61	3.97	4.38	4.81	4.97	5.06	5.14	5.18	4.65 *
	-10%	0.86	0.94	1.03	1.13	1.16	1.18	1.20	1.20	0.69 *
	10%	0.80	0.86	0.94	1.02	1.05	1.06	1.07	0.00 #	0.00**
	20%	3.09	3.35	3.63	3.91	4.00	4.05	4.08	"	"
	30%	6.77	7.31	7.91	8.48	8.67	8.76	0.00 #	"	"
DB 280 SE	-30%	5.86	6.78	7.93	9.32	9.99	10.40	10.86	11.30	11.54
	-20%	2.42	2.79	3.25	3.81	4.07	4.23	4.42	4.59	4.68
	-10%	0.57	0.65	0.76	0.89	0.95	0.98	1.02	1.06	1.08
	10%	0.52	0.59	0.68	0.79	0.84	0.87	0.91	0.94	0.00 #
	20%	1.99	2.27	2.61	3.02	3.22	3.33	3.46	0.00 #	"
	30%	4.32	4.92	5.65	6.53	6.94	7.18	7.45	"	"
Escort 1.3 HC Sedan	-30%	8.50	9.42	10.46	11.54	11.97	12.19	12.41	11.06 *	6.68 *
	-20%	3.55	3.91	4.32	4.74	4.90	4.99	5.06	3.71 *	0.00**
	-10%	0.84	0.92	1.02	1.11	1.14	1.16	1.18	0.00**	"
	10%	0.78	0.85	0.92	1.00	1.03	1.04	0.00 #	"	"
	20%	3.01	3.27	3.55	3.83	3.93	0.00 #	"	"	"
	30%	6.58	7.13	7.72	8.29	0.00 #	"	"	"	"
Kadett 13 S	-30%	9.88	10.73	11.65	12.52	12.82	12.96	13.06	12.92 *	10.24 *
	-20%	4.14	4.47	4.83	5.15	5.26	5.31	5.34	5.19 *	2.71 *
	-10%	0.99	1.06	1.14	1.21	1.23	1.24	1.24	1.10 *	0.00**
	10%	0.92	0.98	1.04	1.09	1.11	1.11	1.11	0.00**	"
	20%	3.56	3.78	4.01	4.20	4.25	4.26	0.00 #	"	"
	30%	7.81	8.28	8.74	9.11	9.20	0.00 #	"	"	"
Golf (37 kW)	-30%	7.43	8.29	9.27	10.31	10.77	11.03	10.50 *	5.55 *	0.00**
	-20%	3.04	3.39	3.78	4.19	4.38	4.48	3.82 *	0.00**	"
	-10%	0.71	0.79	0.88	0.97	1.01	1.04	0.32 *	"	"
	10%	0.64	0.71	0.78	0.86	0.90	0.00 #	0.00**	"	"
	20%	2.44	2.70	2.98	3.29	0.00 #	"	"	"	"
	30%	5.27	5.82	6.44	0.00 #	"	"	"	"	"

dann auf Basis der Geschwindigkeiten x_{opt} bzw. $(1+\alpha) \cdot x_{opt}$ ermittelt, wenn diese Geschwindigkeiten kleiner oder gleich x_{max} sind; ansonsten tritt bei der Kostenermittlung x_{max} an ihre Stelle. Bezugsgröße der entscheidungsrelevanten Kosten ist also die Geschwindigkeit (vgl. auch Abb. 9):

$$x = \begin{cases} (1 + \alpha) \cdot x_{opt} & | (1 + \alpha) \cdot x_{opt} \leq x_{max} \\ x_{max} & | (1 + \alpha) \cdot x_{opt} > x_{max} \end{cases}$$

Dies ist nötig, weil es wenig Sinn hat, Kosten in einen Kostenvergleich einzubeziehen, die nicht realisierbaren Geschwindigkeiten zugeordnet sind.

Als Folge davon hat x_{opt} in den Tab. 12 und 13, wenn $x_{opt} > x_{max}$ nur noch Bedeutung als Multiplikator von $1 + \alpha$; Bestimmungsgröße der betrachteten Kosten ist x_{opt} nicht mehr, wenn es größer als x_{max} ist.

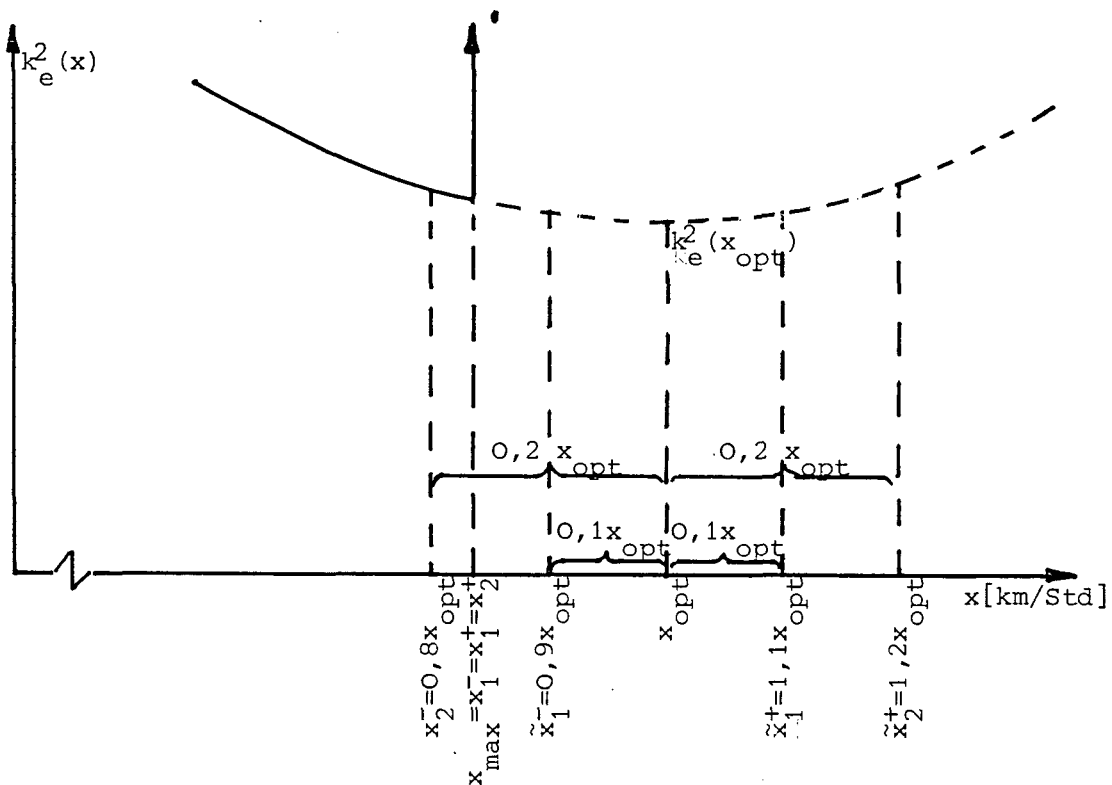


Abb. 9: Für die Tab. 12 und 13 relevante Zusammenhänge, wenn $x_{opt} > x_{max}$.

Die aufgezeigten Zusammenhänge sind in den Tab. 12 und 13 wie folgt berücksichtigt worden:

Ein Nummernzeichen (#) bedeutet, daß zwar $x_{opt} \leq x_{max}$ ist, daß aber dennoch $(1 + \alpha) \cdot x_{opt} > x_{max}$ ist (was natürlich nur bei positivem α zutreffen kann). In diesem Fall tritt in den Berechnungen die Höchstgeschwindigkeit x_{max} an die Stelle der nicht realisierbaren Geschwindigkeit $(1 + \alpha) \cdot x_{opt}$.¹⁾

Ein Stern (*) kennzeichnet grundsätzlich $x_{opt} > x_{max}$. Dabei sind jedoch zwei Fälle zu unterscheiden, wie aus Abb. 9 entnommen werden kann.

- (1) Wenn zwar (wie in Abb. 9) $x_{opt} > x_{max}$, kann dennoch für negatives α die Bedingung $(1 + \alpha) \cdot x_{opt} \leq x_{max}$ erfüllt sein; in Abb. 9 trifft dies für x_2^- zu, das gleich der Geschwindigkeit $x_{opt} \cdot (1 - 0,2)$ ist. In diesem Fall wird mit $(1 + \alpha) \cdot x_{opt}$ gerechnet und das Ergebnis mit einem Stern gekennzeichnet. Vergleichsgeschwindigkeit zu $(1 + \alpha) \cdot x_{opt}$ bei der Ermittlung der Steigerung der kostenäquivalenten Kraftstoffmenge in Tab. 13 ist dabei x_{max} , weil (das errechnete) x_{opt} nicht realisierbar ist.
- (2) Wenn sowohl $x_{opt} > x_{max}$, als auch $(1 + \alpha) \cdot x_{opt} > x_{max}$ gilt, wird mit x_{max} gearbeitet und das Ergebnis mit zwei Sternen ausgedrückt. Diese Situation besteht in Abb. 9, wenn $\alpha = 0,1$ bzw. $100 \alpha\% = 10\%$, sowohl für positives als auch für negatives α ; für $\alpha = 0,2$ bzw. $100 \alpha\% = 20\%$ gilt sie nur für positives α .

Die beschriebene Vorgehensweise führt natürlich dazu, daß man, sobald bei steigendem α die Situation $(1 + \alpha) \cdot x_{opt} > x_{max}$ einmal erreicht wurde, stets dieselben Ergebnisse erhält, weil dann unabhängig von α die Höchstgeschwindigkeit stets die realisierbare Optimalgeschwindigkeit bleibt (und nicht die errechnete "Optimal"geschwindigkeit), und weil dann die Geschwindigkeiten $(1 + \alpha) \cdot x_{opt} > x_{max}$ ebenfalls nicht mehr realisierbar sind.

¹⁾ Dieser Sachverhalt, der relativ einfach ist, wird in Abb. 9 nicht dargestellt.

2. Die vorgegebenen prozentualen Steigerungen der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer entsprechenden höchstzulässigen Über- bzw. Unterschreitungen der optimalen Fahrgeschwindigkeiten

Wenn man auch hier, wie dies bereits bezüglich der Tab. 4 u. 5 einerseits sowie 6 und 7 andererseits im allgemeinen Teil geschehen ist, die Fragestellung der Tab. 12 bzw. 13 umkehrt, dann erhält man die Tab. 14 und 15.

Dabei gibt Tab. 14 die Fahrgeschwindigkeiten an, die nicht überschritten (x^+) bzw. nicht unterschritten (x^-) werden dürfen, wenn die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten nicht um mehr als einen vorgegebenen Prozentsatz p steigen dürfen.

Analog dazu enthält Tab. 15 die Prozentsätze, um welche die optimale Fahrgeschwindigkeit höchstens überschritten (α^+ bzw. positive Prozentsätze) respektive unterschritten werden darf (α^- bzw. negative Prozentsätze), wenn die minimalen entscheidungsrelevanten Kosten nicht um mehr als einen vorgegebenen Prozentsatz p steigen dürfen.

Bezüglich der Behandlung von Geschwindigkeiten, welche die Höchstgeschwindigkeit überschreiten, gilt für die Tab. 14 und 15 folgendes:

Ein Nummernzeichen (#) bedeutet, wie bei den Tab. 12 und 13, daß zwar $x_{\text{opt}} \leq x_{\text{max}}$ ist, daß sich aber ohne Beachtung der Höchstgeschwindigkeit für x^+ ein Wert ergeben würde, der x_{max} übersteigt. In diesem Fall wird in Tab. 14 die Höchstgeschwindigkeit x_{max} eingesetzt; zur Bestimmung des Wertes in Tab. 15 wird mit x_{max} gerechnet, und es gilt dann

$$\alpha^+ = \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{opt}}} - 1$$

In beiden Fällen werden die ausgedruckten Werte durch das Nummernzeichen (#) gekennzeichnet.

Tab. 14

Fahrgeschwindigkeiten, welche nicht ueberschritten (x^+) bzw. nicht unterschritten (x^-) werden duerfen, wenn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der entscheidungsrelevanten variablen Kosten pro gefahrenen Kilometer von 100 p % bei Zeitlohn nicht ueberschritten werden duerfen,

FAHRZEUG MARKE und TYP		bei einem Verhaeltnis zwischen Lohnsatz und Kraftstoffpreis von $\pi_2 : \pi_1$ gleich.																		
		p	2 : 1		3 : 1		5 : 1		10 : 1		15 : 1		20 : 1		30 : 1		50 : 1		75 : 1	
			x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+
DB 240 D	1%	69.8	83.8	73.8	88.3	80.3	95.7	91.9	109.3	100.5	119.4	107.4	127.7	118.5	141.1	143.0*	143.**	143.0*	143.**	
	2%	67.0	86.7	70.9	91.4	77.3	99.0	88.5	113.1	96.7	123.5	103.4	132.1	114.1	143.0#	"	"	"	"	
	4%	63.0	91.0	66.9	95.8	73.0	103.7	83.8	118.4	91.6	129.4	97.9	138.5	108.0	"	"	"	"	"	
	8%	57.6	97.0	61.4	102.1	67.2	110.5	77.3	126.2	84.6	137.9	90.4	143.0#	99.8	"	"	"	"	"	
Golf Diesel	1%	61.5	76.6	68.6	84.8	79.2	97.1	96.7	117.8	109.0	132.6	118.8	144.0#	144.0*	144.**	144.0*	144.**	144.0*	144.**	
	2%	58.6	79.9	65.5	88.3	75.7	101.0	92.6	122.5	104.5	137.8	113.9	"	"	"	"	"	"	"	
	4%	54.7	84.7	61.3	93.5	71.0	106.7	87.1	129.3	98.3	144.0#	107.2	"	"	"	"	"	"	"	
	8%	49.4	91.7	55.6	100.9	64.7	115.0	79.6	139.1	90.0	"	98.2	"	"	"	"	"	"	"	
Audi 100 (74 kW)	1%	67.8	86.5	75.6	95.3	87.1	108.4	106.3	130.8	119.8	146.7	130.5	159.5	147.5	176.0#	176.0*	176.**	176.0*	176.**	
	2%	64.2	90.7	71.8	99.6	83.0	113.1	101.6	136.2	114.6	152.7	124.9	165.9	141.3	"	"	"	"	"	
	4%	59.3	96.7	66.7	105.9	77.5	120.0	95.2	144.0	107.6	161.3	117.4	175.2	132.8	"	"	"	"	"	
	8%	52.8	105.4	59.9	115.1	70.1	129.9	86.6	155.5	98.1	173.9	107.2	176.0#	121.5	"	"	"	"	"	
BMW 316	1%	66.6	83.0	72.6	89.6	81.6	99.9	97.0	117.7	107.9	130.6	116.7	141.0	130.6	157.7	151.1	175.0#	175.0*	175.**	
	2%	63.4	86.6	69.3	93.3	78.1	103.8	93.0	122.2	103.5	135.6	112.0	146.4	125.4	163.6	145.1	"	"	"	
	4%	59.0	91.7	64.7	98.7	73.2	109.6	87.4	128.8	97.5	142.8	105.5	154.1	118.2	172.2	136.8	"	"	"	
	8%	53.0	99.1	58.5	106.4	66.6	117.9	80.0	138.3	89.4	153.2	96.8	165.3	108.5	175.0#	125.7	"	"	"	
DB 280 S E	1%	62.1	81.6	69.3	89.4	80.0	101.3	97.7	121.6	110.1	136.1	120.0	147.7	135.6	166.3	158.5	193.7	179.7	210.0#	
	2%	58.5	85.9	65.5	93.9	75.9	106.0	93.1	126.9	105.1	141.8	114.7	153.9	129.7	173.1	151.8	201.5	172.1	"	
	4%	53.5	92.1	60.4	100.3	70.4	112.9	86.9	134.6	98.4	150.2	107.4	162.8	121.7	182.9	142.6	210.0#	161.8	"	
	8%	46.9	101.2	53.5	109.7	63.1	122.9	78.6	145.8	89.3	162.4	97.8	175.8	111.0	197.3	130.3	"	148.1	"	
Escort 1.3 HC Sedan	1%	68.6	85.8	75.2	93.0	84.9	104.1	101.5	123.4	113.3	137.3	122.6	148.5	137.6	157.0#	157.0*	157.**	157.0*	157.**	
	2%	65.3	89.5	71.7	96.9	81.2	108.3	97.3	128.2	108.6	142.6	117.7	154.1	132.0	"	"	"	"	"	
	4%	60.7	94.9	66.9	102.5	76.1	114.4	91.5	135.1	102.2	150.2	110.8	157.0#	124.4	"	"	"	"	"	
	8%	54.5	102.6	60.5	110.6	69.2	123.1	83.6	145.2	93.7	157.0#	101.6	"	114.2	"	"	"	"	"	
Kadett 13 S	1%	68.4	84.0	74.3	90.6	83.2	100.8	98.5	118.7	109.4	131.6	118.1	142.1	132.0	158.8	162.0*	162.**	162.0*	162.**	
	2%	65.3	87.3	71.0	94.1	79.7	104.6	94.5	123.1	105.0	136.5	113.4	147.3	126.8	162.0#	"	"	"	"	
	4%	61.1	92.2	66.6	99.2	75.0	110.1	89.1	129.5	99.1	143.5	107.1	154.9	119.7	"	"	"	"	"	
	8%	55.3	99.1	60.7	106.5	68.6	118.1	81.8	138.7	91.1	153.7	98.4	162.0#	110.1	"	"	"	"	"	
Golf (37 kW)	1%	59.9	76.5	67.5	85.1	78.5	97.9	96.8	119.4	109.7	134.6	119.9	138.0#	138.0*	138.**	138.0*	138.**	138.0*	138.**	
	2%	56.8	80.2	64.1	89.0	74.8	102.2	92.5	124.4	104.9	138.0#	114.7	"	"	"	"	"	"	"	
	4%	52.5	85.6	59.6	94.7	69.8	108.4	86.7	131.7	98.4	"	107.7	"	"	"	"	"	"	"	
	8%	46.9	93.4	53.6	103.0	63.2	117.5	78.9	138.0#	89.7	"	98.3	"	"	"	"	"	"	"	

Tab. 15

Prozentuale Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit, welche hoechstens zulaessig sind, wenn bei Zahlung von Zeitlohn eine vorgegebene prozentuale Zunahme der minimalen entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer von $100 \cdot p\%$ nicht ueberschritten werden soll. Dabei gibt α^+ die hoechst - zulaessige Ueberschreitung, α^- die hoechstzulaessige Unterschreitung der optimalen Fahrgeschwindigkeit in Prozent der letzteren an.

FAHRZEUG MARKE und TYP	p	Das verhaeltnis zwischen Lohnsatz Π_2 und Kraftstoffpreis Π_1 , also $\Pi_2 : \Pi_1$ sei gleich.																	
		2 : 1		3 : 1		5 : 1		10 : 1		15 : 1		20 : 1		30 : 1		50 : 1		75 : 1	
		α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+	α^-	α^+
DB 240 D	1%	-9.0	9.2	-8.8	9.1	-8.6	8.9	-8.5	8.8	-8.5	8.8	-8.5	8.8	-8.5	8.9	0.0*	0.**	-0.0*	0.**
	2%	-12.7	13.1	-12.4	12.9	-12.1	12.7	-11.9	12.5	-11.9	12.6	-11.9	12.6	-11.9	0.0#	"	"	"	"
	4%	-17.8	18.6	-17.4	18.3	-16.9	18.0	-16.6	17.9	-16.6	17.9	-16.6	18.0	-16.6	"	"	"	"	"
	8%	-24.6	26.5	-24.2	26.1	-23.6	25.7	-23.1	25.6	-23.0	25.7	-22.9	0.0#	-23.0	"	"	"	"	"
Golf Diesel	1%	-10.6	11.3	-10.3	10.8	-9.9	10.5	-9.6	10.2	-9.5	10.1	-9.4	0.0#	0.0*	0.**	0.0*	0.**	0.0*	0.**
	2%	-14.9	16.1	-14.3	15.5	-13.8	15.0	-13.4	14.5	-13.3	14.4	-13.2	"	"	"	"	"	"	"
	4%	-20.6	23.0	-19.8	22.2	-19.2	21.5	-18.6	20.8	-18.4	0.0#	-18.3	"	"	"	"	"	"	"
	8%	-28.3	33.2	-27.3	32.0	-26.3	30.9	-25.5	30.1	-25.3	"	-25.1	"	"	"	"	"	"	"
Audi 100 (74 Kw)	1%	-11.8	12.6	-11.2	11.9	-10.6	11.3	-10.1	10.7	-9.8	10.4	-9.7	10.3	-9.6	0.0#	0.0*	0.**	0.0*	0.**
	2%	-16.5	18.0	-15.6	17.0	-14.8	16.1	-14.0	15.3	-13.7	14.9	-13.6	14.8	-13.4	"	"	"	"	"
	4%	-22.8	25.8	-21.7	24.4	-20.5	23.1	-19.4	21.9	-19.0	21.4	-18.8	21.2	-18.6	"	"	"	"	"
	8%	-31.3	37.1	-29.7	35.2	-28.1	33.3	-26.7	31.6	-26.1	30.9	-25.8	0.0#	-25.5	"	"	"	"	"
BMW 316	1%	-10.8	11.2	-10.3	10.8	-9.8	10.3	-9.4	9.9	-9.3	9.8	-9.2	9.7	-9.2	9.7	-9.1	0.0#	0.0*	0.**
	2%	-15.1	16.0	-14.4	15.3	-13.8	14.7	-13.2	14.1	-13.0	14.0	-12.9	13.9	-12.8	13.8	-12.8	"	"	"
	4%	-21.0	22.9	-20.1	21.9	-19.2	21.0	-18.3	20.2	-18.1	20.0	-17.9	19.9	-17.8	19.8	-17.7	"	"	"
	8%	-29.0	32.7	-27.7	31.4	-26.4	30.2	-25.3	29.1	-24.9	28.7	-24.7	28.6	-24.5	0.0#	-24.4	"	"	"
DB 280 SE	1%	-13.1	14.0	-12.3	13.1	-11.4	12.2	-10.6	11.3	-10.3	10.9	-10.1	10.7	-9.9	10.5	-9.7	10.3	-9.6	0.0#
	2%	-18.3	20.1	-17.1	18.7	-15.9	17.4	-14.8	16.1	-14.3	15.6	-14.1	15.3	-13.8	15.0	-13.5	14.8	-13.4	"
	4%	-25.2	28.8	-23.6	26.9	-22.0	25.0	-20.5	23.2	-19.8	22.4	-19.5	22.0	-19.1	21.6	-18.8	0.0#	-18.6	"
	8%	-34.4	41.5	-32.3	38.8	-30.1	36.1	-28.0	33.4	-27.2	32.4	-26.7	31.8	-26.2	31.2	-25.8	"	-25.5	"
Escort 1.3 HC Sedan	1%	-10.9	11.4	-10.4	10.9	-9.9	10.4	-9.5	10.0	-9.4	9.9	-9.3	9.8	-9.2	0.0#	-0.0*	0.**	0.0*	0.**
	2%	-15.2	16.2	-14.5	15.5	-13.9	14.9	-13.3	14.3	-13.1	14.1	-13.0	14.0	-12.9	"	"	"	"	"
	4%	-21.2	23.2	-20.2	22.2	-19.3	21.3	-18.5	20.5	-18.2	20.2	-18.0	0.0#	-17.9	"	"	"	"	"
	8%	-29.2	33.2	-27.9	31.9	-26.6	30.6	-25.5	29.4	-25.1	0.0#	-24.9	"	-24.7	"	"	"	"	"
Kadett 13 S	1%	-10.1	10.5	-9.7	10.1	-9.4	9.8	-9.1	9.6	-9.0	9.5	-9.0	9.5	-9.0	9.5	-0.0*	0.**	0.0*	0.**
	2%	-14.1	14.9	-13.6	14.4	-13.1	14.0	-12.8	13.6	-12.6	13.5	-12.6	13.5	-12.6	0.0#	"	"	"	"
	4%	-19.7	21.2	-19.0	20.6	-18.3	20.0	-17.8	19.5	-17.6	19.4	-17.5	19.4	-17.5	"	"	"	"	"
	8%	-27.2	30.4	-26.2	29.5	-25.3	28.6	-24.5	28.0	-24.3	27.9	-24.2	0.0#	-24.1	"	"	"	"	"
Golf (37 Kw)	1%	-11.8	12.6	-11.2	12.0	-10.6	11.3	-10.1	10.8	-9.9	10.6	-9.8	0.0#	0.0*	0.**	0.0*	0.**	-0.0*	0.**
	2%	-16.4	18.0	-15.6	17.1	-14.8	16.2	-14.1	15.4	-13.9	0.0#	-13.7	"	"	"	"	"	"	"
	4%	-22.7	25.9	-21.6	24.6	-20.5	23.3	-19.6	22.2	-19.2	"	-19.0	"	"	"	"	"	"	"
	8%	-31.0	37.4	-29.5	35.5	-28.1	33.7	-26.8	0.0#	-26.3	"	-26.0	"	"	"	"	"	"	"

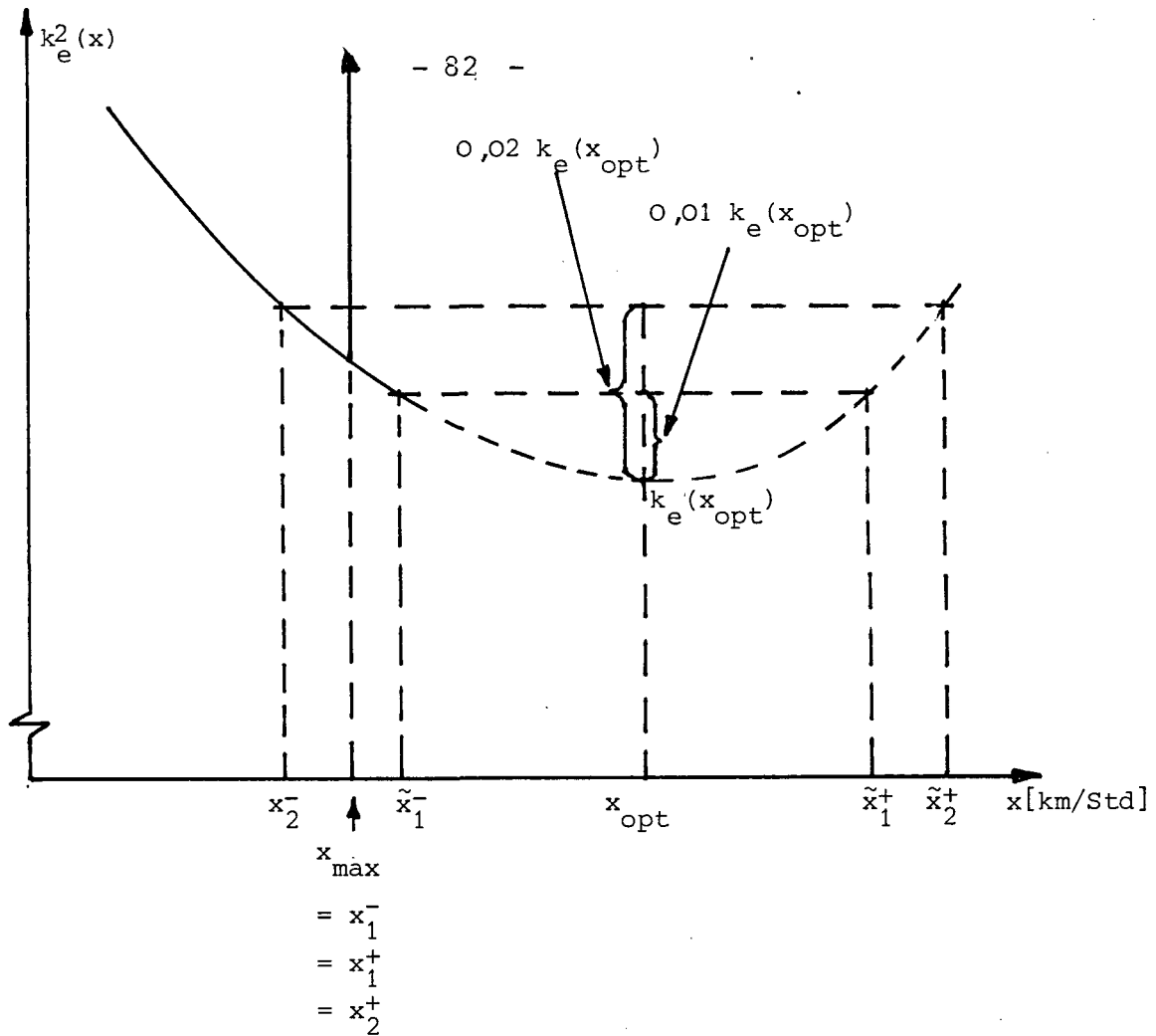


Abb. 10: Für die Tab. 14 und 15 relevante Zusammenhänge, wenn $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$

Der Stern (*) bedeutet auch in den Tab. 14 und 15, daß $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$ ist; in Analogie zu den Tab. 12 und 13 sind dabei zwei Fälle zu unterscheiden (vgl. Abb. 10):

- (1) Trotz $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$ erhält man $x^- \leq x_{\text{max}}$.

Dies trifft in Abb. 10 für x_2^- zu.

In diesem Fall wird in Tab. 14 die Geschwindigkeit x^- mit einem Stern ausgedrückt. In Tab. 15 ist dann x_{max} Vergleichsgröße zu x^- , weil x_{opt} nicht realisierbar ist, und es gilt dann

$$\alpha^- = \frac{x^-}{x_{\text{max}}} - 1,$$

das ebenfalls mit einem Stern ausgedrückt wird.

(2) Wenn $x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$ und $\tilde{x}^{\pm} > x_{\text{max}}$, was in Abb. 10 für $\tilde{x}_1^-, \tilde{x}_1^+$ u. \tilde{x}_2^+ zutrifft, wird in Tab. 14 als x^{\pm} anstelle von \tilde{x}^{\pm} die Geschwindigkeit x_{max} mit zwei Sternen ausgedruckt. In Tab. 15 wird dann x_{max} Vergleichsgröße zu sich selbst, und man erhält

$$\alpha = \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{max}}} - 1 = 0$$

Es sei noch darauf verwiesen, daß im Fall (2) im realistischen Bereich (d.h. für $x > 0$) stets $\tilde{x}^+ > x_{\text{opt}} > x_{\text{max}}$ gilt, weil aufgrund des Verlaufs der Kurve der entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer \tilde{x}^+ stets größer als x_{opt} sein muß.

Auch in den Tab. 14 und 15 (vor allem in 15) zeigt sich, wie elastisch ein Motor ist. Gemäß Tab. 15 kann ein DB 280 E bei einem Quotienten aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis von 10:1 z.B. um bis zu 11,3 % schneller bzw. um bis zu 10,6 % langsamer gefahren werden als seiner optimalen Fahrgeschwindigkeit entspricht, ohne daß seine entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer um mehr als 1 % über ihr Minimum ansteigen; insgesamt immerhin eine Spanne von rund 22 %. Nach Tab. 14 liegt diese Spanne zwischen 96,8 km/h und 120,6 km/h, umfaßt also einen Bereich von rund 24 km/h.

Es zeigt sich aber auch, daß die Zunahme der vorgenannten Spanne, wenn die zugelassene Kostenerhöhung jeweils um einen Prozentpunkt erhöht wird, rasch abnimmt. Beim zuvor genannten DB 280 SE liegt sie in Tab. 15 für zugelassene prozentuale Kostensteigerungen von 2 % bei 16,2 % bzw. -14,8 %, für 4 % bei 23,3 % bzw. -20,5 % sowie für 8 % bei 33,7 % bzw. -28,1 %. Eine Verdoppelung der zugelassenen prozentualen Kostensteigerung führt also keineswegs zu einer Verdoppelung der genannten Spanne.

Kapitel 5: Zwei kostentheoretische Auswertungen der gewonnenen Erkenntnisse im Zwei-Faktoren-Fall

Versucht man die vorausgehenden Untersuchungen zur optimalen Fahrgeschwindigkeit kostentheoretisch einzuordnen, dann stellt man fest, daß darin nicht nur die Kosteneinflußgröße Beschäftigung sowie die dazugehörigen Prozesse der zeitlichen und der intensitätsmäßigen Anpassung eine Rolle spielen, sondern auch die Kosteneinflußgröße "Faktorpreise" ist darin von zentraler Bedeutung. Dabei erweist sich der Zusammenhang zwischen den Kosteneinflußgrößen Beschäftigung und Faktorpreise so eng, daß eine Analyse und Erklärung der anstehenden kostentheoretischen Phänomene nur bei gleichzeitiger Berücksichtigung beider Kosteneinflußgrößen möglich ist.

I. Die bisherige Darstellung der Kosteneinflußgröße Faktorpreise

Gutenbergs System der Kosteneinflußgrößen enthält die Faktorpreise als "die dritte Hauptkosteneinflußgröße"¹⁾, neben den Faktorqualitäten und den Faktorproportionen. Daß den Faktorpreisen in der Kostentheorie große Bedeutung zukommt, folgt schon daraus, daß Kosten generell als das Produkt aus Faktormenge und Faktorpreisen definiert werden²⁾. In seiner theoretischen Behandlung der Kosteneinflußgröße Faktorpreise geht Gutenberg³⁾ davon aus, daß die Faktormengen - das Mengengerüst der Kosten - gegeben und entsprechend einer Produktionsfunktion vom Typ B technisch eindeutig definiert sind. Unter dieser Annahme - welche praktisch die intensitätsmäßige Anpassung zur Grundlage der Untersuchung macht - hat Gutenberg den Einfluß der Faktorpreise auf die Höhe der Kosten untersucht, und zwar sowohl für den Fall konstanter Faktorpreise, als auch für den Fall, daß die Faktorpreise von der Produktmenge funktional abhängig sind und mit der Produktmenge steigen⁴⁾. Gutenberg verweist auch auf Zusammenhänge zwischen den Faktorpreisen und den Faktorqualitäten sowie auf die Möglichkeiten der alternativen Substitution im Fall steigender Faktorpreise⁵⁾.

1) E. Gutenberg, Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1, Die Produktion, 22. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York 1976, S. 346.

2) So z.B. E. Gutenberg, a.a.O., S. 344 und 346.

3) Ebenda, S. 344 ff.

4) Ebenda, S. 415 ff.

5) Ebenda, S. 420.

II. Die Stellung der Faktorpreise in der vorliegenden Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung hält zwar an der Darstellung Gutenbergs fest, daß die Faktoreinsatzmengen bei intensitätsmäßiger Anpassung durch technische Verbrauchsfunktionen eindeutig definiert sind. Sie geht aber insofern darüber hinaus, als sie die Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung explizit einbezieht und dadurch die Möglichkeit der Faktorsubstitution (hier für Kraftstoff und Arbeitszeit) in den Grenzen ihrer Verbrauchsfunktionen eröffnet. Dies hat zur Folge, daß die Einsatzmengen der Faktoren trotz Limitationalität (in bezug auf die Produktionsgeschwindigkeit bzw. - was dasselbe ist - die Leistungsintensität) durch die Produktmenge nicht mehr eindeutig definiert sind. Zur Wiederherstellung dieser Eindeutigkeit bedarf es vielmehr der Beschränkung der Betrachtung auf kostenminimale Kombinationen von Leistungszeit und Leistungsintensität (im Kraftfahrzeugbeispiel Fahrzeit und Fahrgeschwindigkeit). In Verbindung mit dieser "Minimalkostenkombination auf höherer Ebene"¹⁾ gewinnen die Faktorpreise die Bedeutung wieder, die sie bei der Verdrängung der Produktionsfunktion vom Typ A durch die Produktionsfunktion vom Typ B verloren haben²⁾.

¹⁾ Diese Ausdrucksweise soll andeuten, daß es sich nicht um eine direkte Minimalkostenkombination von Faktoren handelt, sondern um eine Minimalkostenkombination von Faktoren, deren Einsatzmengen nur im Rahmen der durch die intensitätsmäßige und die zeitliche Anpassung definierten Faktormengen und der daraus folgenden Kostenfunktionen variierbar sind.

²⁾ Vgl. E. Gutenberg, a.a.O., S. 318 ff., v.a. S. 330-337; L. Pack, Die Elastizität der Kosten, a.a.O., S. 172 ff.

III. Der Einfluß variierender Faktorpreise auf die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung und auf die Kosten

Zur Darstellung des Einflusses variierender Faktorpreise auf die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung und auf die Höhe der bei Realisierung dieser optimalen Kombination sich ergebenden Kosten wird auf das im Kapitel 3 benutzte Zahlenbeispiel mit der Verbrauchsfunktion

$$r_i(x) = \frac{1}{1250} x^2 - \frac{3}{50} x + 8 \left[\frac{1}{100 \text{ km}} \right]$$

zurückgegriffen. Zur Vereinfachung der Darstellung wird wieder mit der stundenlohnäquivalenten Kraftstoffmenge $\frac{\pi_2}{\pi_1} [1/\text{Std}]$ und anstelle der Kosten mit der kostenäquivalenten Kraftstoffmenge $k_e(x) : \pi_1 [1/\text{km}]$ gearbeitet. Die maximal zulässige Fahrzeit (Arbeitszeit) sei $t_{\max} = 8 \text{ Std.}$ Die Höchstgeschwindigkeit sei 150 km/Std.

In Tab. 16 sind die dann für Fahrstrecken (bzw. Produktmengen) zwischen 600 und 1 200 km sowie für Werte von $\frac{\pi_2}{\pi_1}$ zwischen 10 und 70 sich ergebenden optimalen (d.h. kostenminimalen) Kombinationen aus Fahrzeit (bzw. Arbeitszeit) und Fahrgeschwindigkeit (bzw. Produktionsgeschwindigkeit oder - was dasselbe ist - Leistungsintensität) sowie die ihnen für die vorgegebenen Fahrstrecken entsprechenden minimalen kostenäquivalenten Kraftstoffmengen dargestellt. Letztere erhält man dann, wenn man Gleichung (17) mit der Fahrstrecke M multipliziert, also bildet

$$(18) \frac{k_e^2(x_{\text{opt}})}{\pi_1} = M \cdot \left[\frac{1}{100} \cdot \left(\frac{1}{1250} x_{\text{opt}}^2 - \frac{3}{50} x_{\text{opt}} + 8 \right) + \frac{\pi_2}{\pi_1 \cdot x_{\text{opt}}} \right] [1]$$

Auf den Werten der Tab. 16 basieren die Abbildungen 11, 12 und 13. Abb. 11 gibt dabei eine dreidimensionale Darstellung der durch Tab. 16 beschriebenen Zusammenhänge. In Abb. 12 werden die kostenäquivalenten Kraftstoffmengen bei vorgegebenem $\pi_2:\pi_1$ dargestellt; die Kurven der Abb. 12 entsprechen also den Spalten der Tab. 16. Abb. 13 gibt die kostenäquivalenten Kraftstoffmengen für vorgegebene Fahrstrecken (Produktmengen) in Abhängigkeit von $\pi_2:\pi_1$ wieder; die Kurven der Abb. 13 entsprechen also den Zeilen der Tab. 16.

1. Die Abhängigkeit der Kosten von der Produktmenge

Aus Abb. 12 geht folgendes hervor:

Die bisher in der Literatur vorherrschende Meinung, eine kostenoptimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung erfolge stets dergestalt, daß zunächst zeitliche Anpassung und dann intensitätsmäßige Anpassung vorgenommen werde (vgl. Abb. 4 weiter oben) bedarf der Ergänzung. Sobald die optimale Fahrgeschwindigkeit größer oder gleich der maximalen ist, also

$$x_{\text{opt}} \geq x_{\text{max}}$$

gilt, kommt intensitätsmäßige Anpassung nicht mehr vor; stattdessen wird nur noch zeitliche Anpassung vorgenommen, und zwar von Anfang an auf Basis der maximalen Leistungsdensität (bzw. Fahr- bzw. Produktionsgeschwindigkeit). In Abb. 12 ist dies bereits ab $\pi_2:\pi_1 = 40,5$ der Fall¹⁾, also für ein Verhältnis aus Stundenlohn und Kraftstoffpreis, das keineswegs als sehr hoch bezeichnet werden kann.

1) Im vorliegenden Zahlenbeispiel wird x_{opt} für $\pi_2:\pi_1 = 40,5$ gleich der maximalen Fahrgeschwindigkeit x_{max} von 150 km/Std.

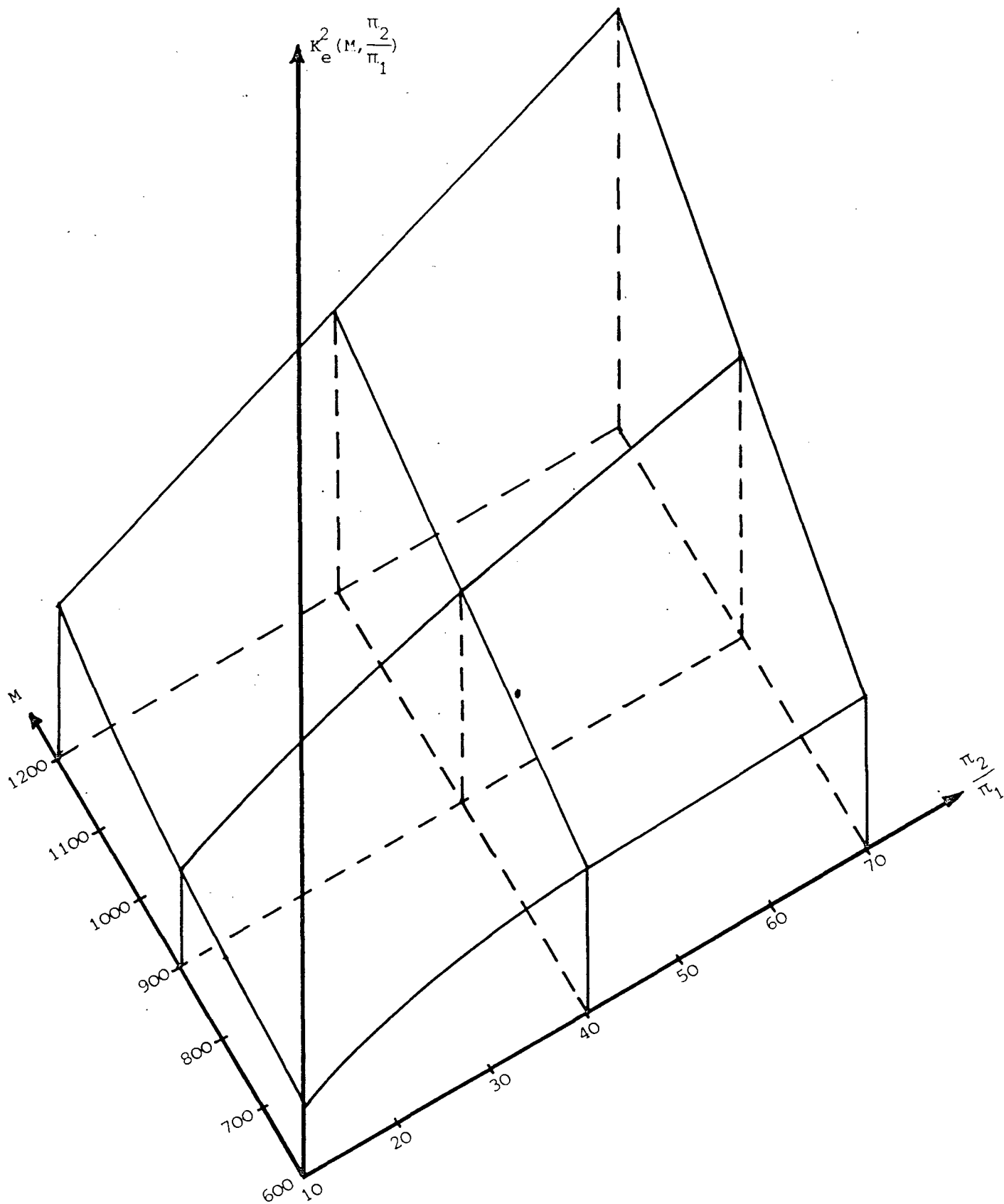
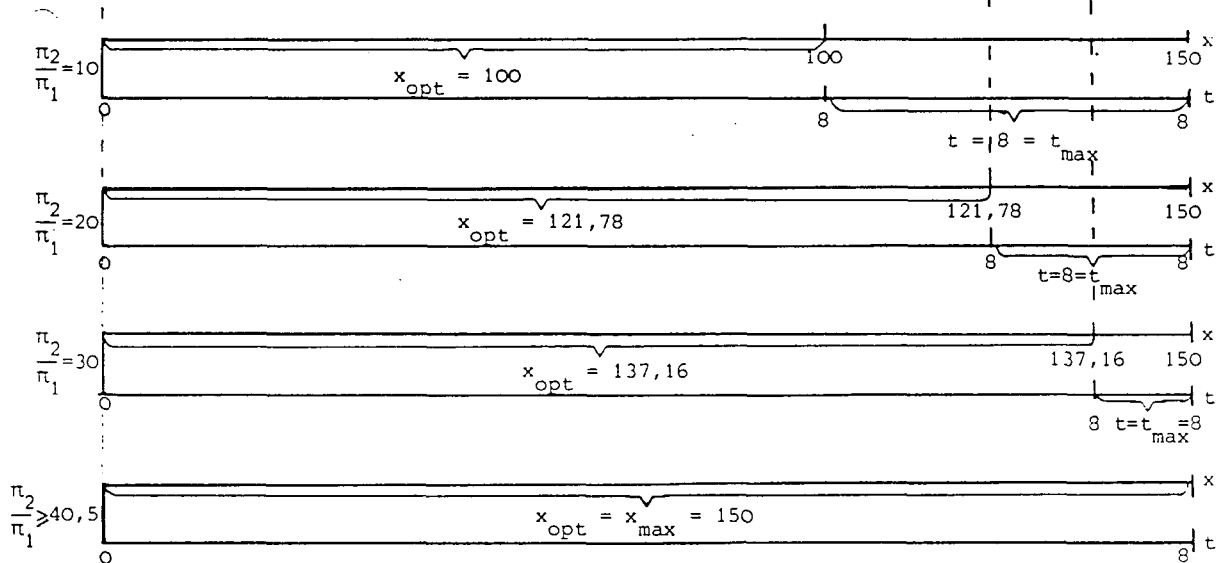
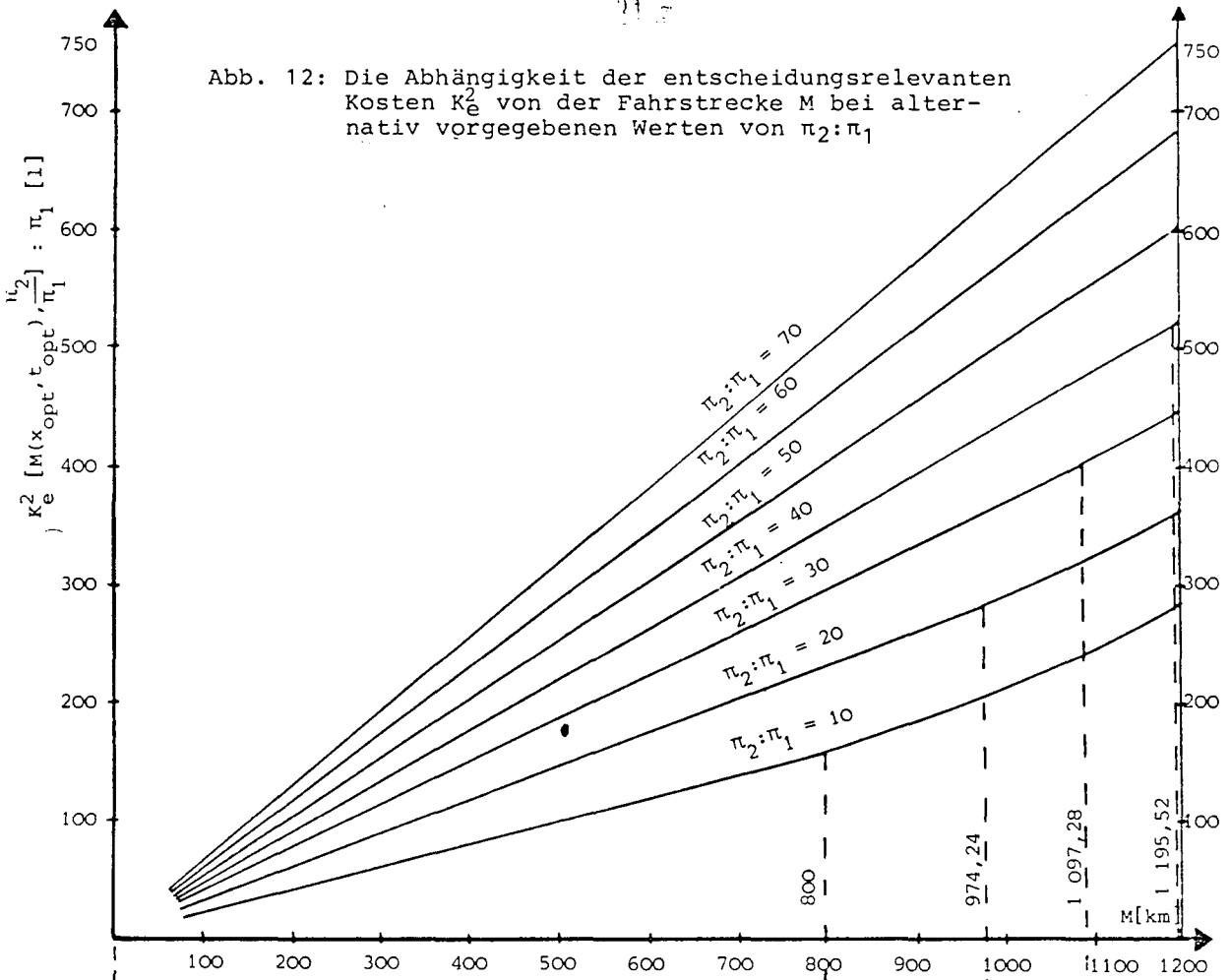


Abb. 11: Die entscheidungsrelevanten Kosten K_e^2 in Abhängigkeit von der Fahrstrecke M und dem Verhältnis aus Lohnsatz π_2 und Kraftstoffpreis π_1



(nur noch zeitl. Anpassung, wenn $x_{opt} = x_{max}$)

2. Die Abhängigkeit der Kosten von den Faktorpreisen

Aus Abb. 13 kann folgendes entnommen werden:

Wenn bei gegebener Fahrstrecke (Produktmenge) das Verhältnis aus Lohnsatz π_2 und Kraftstoffpreis π_1 steigt, dann können sich bezüglich der optimalen Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung je nach der Größe der Fahrstrecke (bzw. Produktmenge) unterschiedliche Entwicklungen ergeben:

Für $M = 600$ wird, wenn $\pi_2:\pi_1$ von 10 bis auf 40,5 steigt, die Geschwindigkeit erhöht und gleichzeitig die Fahrzeit nach der Formel $t = M:x$ verringert. Für $\pi_2:\pi_1 > 40,5$ wird die Maximalgeschwindigkeit eingehalten.

Für $M = 750$ gilt dasselbe wie für $M = 600$.

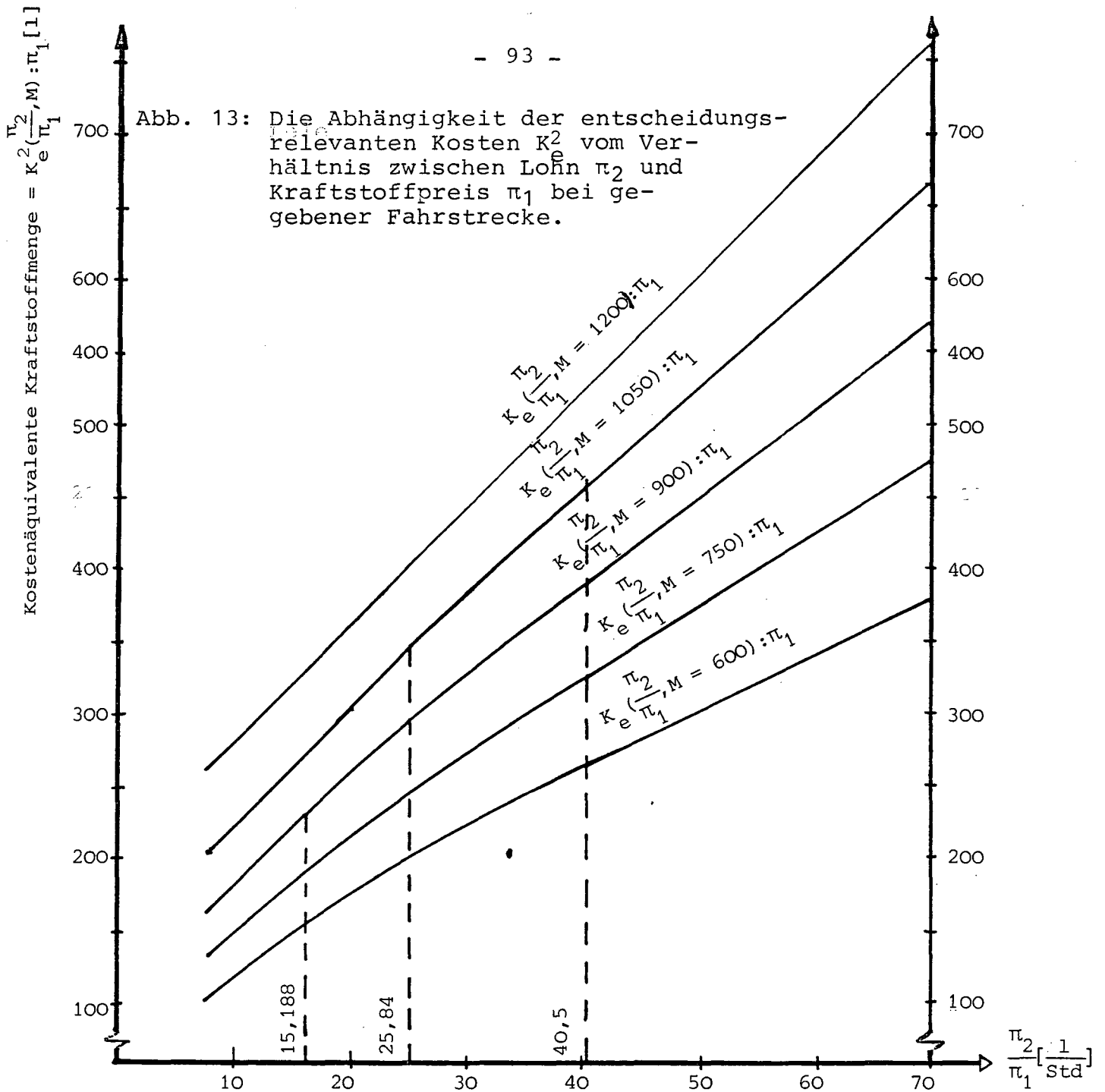
Für $M = 900$ wird bis $\pi_2:\pi_1 = 15,188$ die maximale Arbeitszeit $t_{\max} = 8$ realisiert, so daß sich als Geschwindigkeit $900 : 8 = 112,4$ km/Std. ergibt. Zwischen $\pi_2:\pi_1 = 15,188$ und $\pi_2:\pi_1 = 40,5$ wird die Geschwindigkeit erhöht und die Fahrzeit entsprechend vermindert. Für Werte über 40,5 wird die Maximalgeschwindigkeit eingehalten.

Für $M = 1050$ wird bis $\pi_2:\pi_1 = 25,84$ die maximale Arbeitszeit $t_{\max} = 8$ gewählt, woraus $x = 1050 : 8 = 131,25$ km/Std. folgt.

Zwischen $\pi_2:\pi_1 = 25,84$ und $\pi_2:\pi_1 = 40,5$ werden gleichzeitig die Geschwindigkeit erhöht und die Fahrzeit verringert.

Ab $\pi_2:\pi_1 > 40,5$ wird analog zu $M = 900$ verfahren.

Für $M = 1200$ muß unabhängig von $\pi_2:\pi_1$ mit $x_{\max} = 150$ und $t_{\max} = 8$ gearbeitet werden.



M	100	121,78	137,16	150	$x = x_{max}$	150
M=600	6,00	4,93	4,37	4	$t_{opt} = 4$	4
M=750	7,5	6,16	5,47	5	$t_{opt} = 5$	5
M=900	$x = 112,5$	121,78	137,16	150	$x = x_{max}$	150
	8	8	7,39	6	$t_{opt} = 6$	6
M=1050	$x = 131,25$	137,16	150	150	$x = x_{max}$	150
	8	8	7,66	7	$t = 7$	7
M=1200	$x = x_{max} = 150$					
	8					8

Kapitel 6: Ausdehnung der Analyse auf den Vier-Faktoren-Fall

Gegen die aus der bisherigen Analyse gewonnenen Ergebnisse kann natürlich eingewandt werden, daß sie auf der Untersuchung von nur zwei Faktorarten basieren. Das ist richtig, wenn auch die Kraftstoff- und die Lohnkosten die mit Abstand wichtigsten von der Fahrgeschwindigkeit bzw. Fahrzeit abhängigen Kostenarten eines Kraftfahrzeugs sind.

Um obigem Einwand zu begegnen, werden im folgenden zwei weitere wichtige Faktoren in die Analyse einbezogen: der Ölverbrauch und der Reifenabrieb. Es ist zu prüfen, ob dadurch die bisher gewonnenen Ergebnisse wesentlich verändert werden.

I. Die Verbrauchsfunktionen für Öl und Reifenabrieb

Es ist sehr schwierig, eine einigermaßen exakte funktionale Beziehung zwischen Ölverbrauch und Fahrgeschwindigkeit anzugeben. Denn der Ölverbrauch ist in starkem Maße vom Alter und vom Abnutzungsgrad eines Motors abhängig; zusätzlich hängt er stark von der Motortemperatur ab. Die genannten Bedenken treffen allerdings auch für den Kraftstoffverbrauch zu, wenn auch nicht in gleichem Maße.

Aufgrund von Unterlagen, welche die Firma BMW freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat, kann davon ausgegangen werden, daß zwischen dem spezifischen Ölverbrauch (in l/1000 km) und der Fahrgeschwindigkeit ein Zusammenhang gilt, der etwa der in Abb. 14 wiedergegebenen Form entspricht.

Das bedeutet:

Bis zur halben Maximalgeschwindigkeit kann davon ausgegangen werden, daß der spezifische Ölverbrauch konstant und folglich nicht entscheidungsrelevant ist. Für darüber hinausgehende Geschwindigkeiten läßt sich der spezifische Ölverbrauch bzw. - was dasselbe ist - sein Produktionskoeffizient angenähert durch die Funktion

$$r_3(x) = 2\left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^2 - 1,9\frac{x}{x_{\max}} + 0,55 \left[\frac{1}{100\text{km}}\right]$$

beschreiben.

Der Ölpreis betrage π_3 [DM/l]. Da er stark variieren kann, wird, wie beim Kraftstoffpreis geschehen, nicht ein einziger Preis, sondern ein relativ weit gespannter Bereich erfaßt.

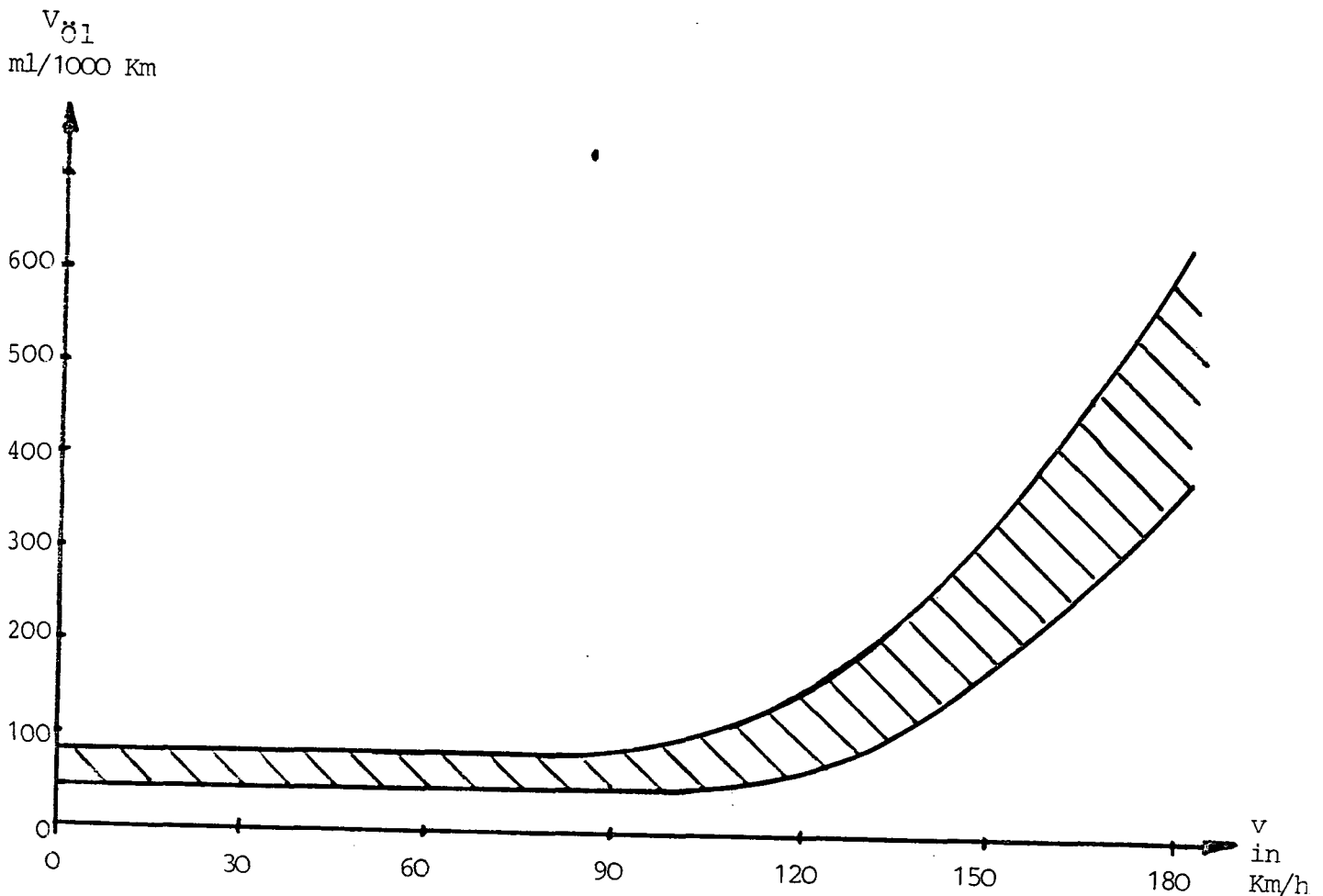
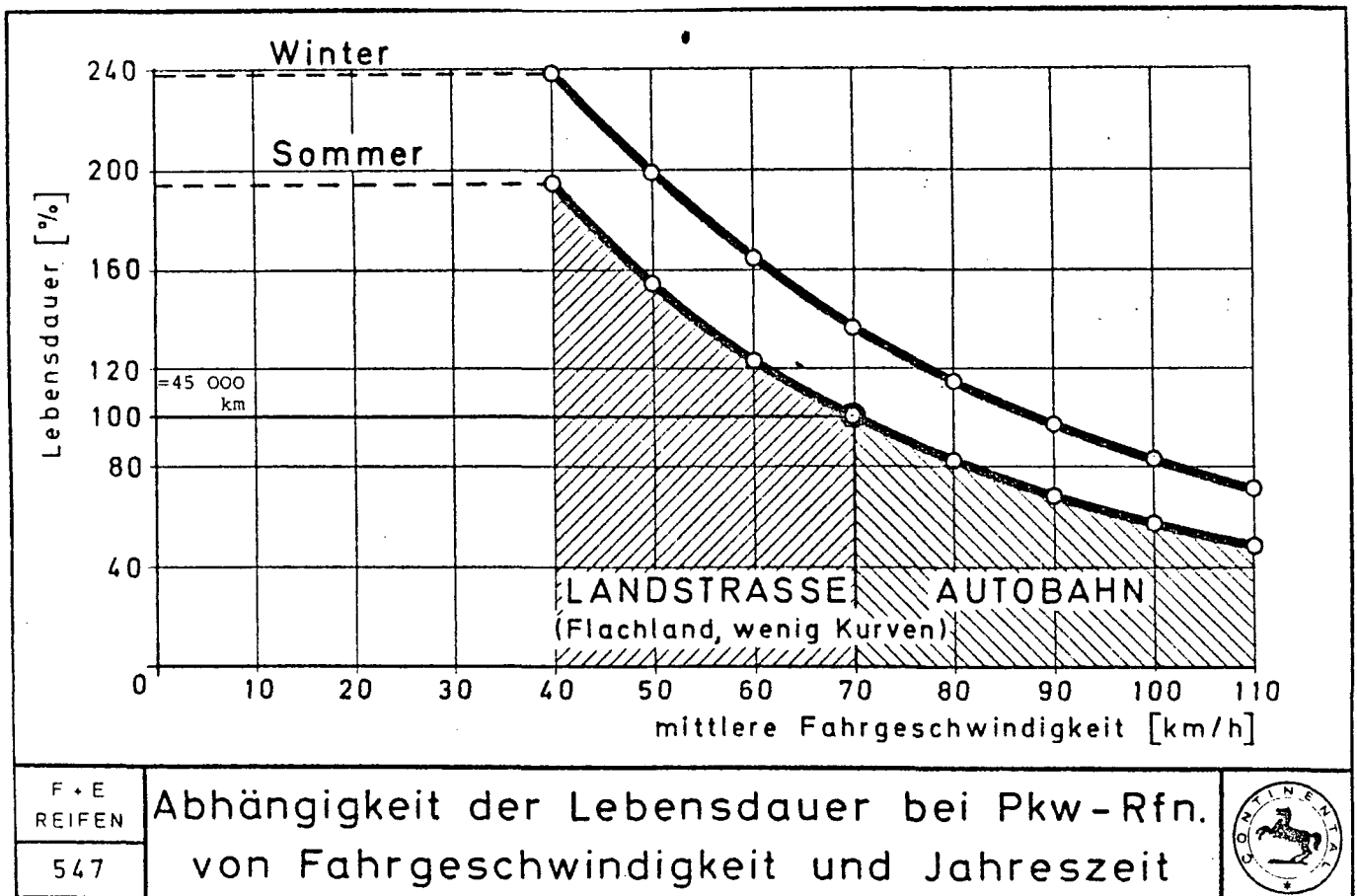


Abb.14 : Ölverbrauch über Fahrgeschwindigkeit.

(durchschnittlicher Erfahrungswert nach BMW)

Auch bezüglich des Reifenabriebs sind einigermaßen exakte Angaben über dessen funktionale Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit nur unter vielen einschränkenden Bedingungen möglich. Das kommt daher, daß der Reifenabrieb vor allem durch den Schlupf des Reifens bestimmt wird, der seinerseits stark von der Kurvenhäufigkeit, von der Zahl und Intensität der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge (also auch von der Fahrweise des Fahrers), von der Straßenbeschaffenheit, der Außentemperatur usw. abhängig ist. Dennoch kann man davon ausgehen, daß der Schlupf mit der Geschwindigkeit steigt und deshalb der Abrieb zunimmt.

Die Zusammenhänge, welche zwischen der Fahrgeschwindigkeit und der Lebensdauer eines Reifens bestehen, sind in Abb. 15 wiedergegeben, welche dankenswerterweise die Firma Continental Gummi-Werke AG zur Verfügung gestellt hat.



F + E
REIFEN
547

Abhängigkeit der Lebensdauer bei Pkw-Rfn.
von Fahrgeschwindigkeit und Jahreszeit



Aufgrund des in Abb. 15 beschriebenen Sachverhalts kann der spezifische Reifenverbrauch (in Reifen/100 km) für ein Kraftfahrzeug mit vier Rädern angenähert durch die Funktion

$$r_4(x) = \frac{1}{1000}(0,00098096x^2 + 0,0054284x + 2,32) \frac{\text{Reifen}}{100 \text{ km}}$$

beschrieben werden; $r_4(x)$ ist gleichzeitig der Produktionskoeffizient des Faktors Reifenverbrauch.

Der Preis eines Reifens sei π_4 [DM/Reifen]

II. Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit im Vier-Faktoren-Fall

Legt man der weiteren Untersuchung das bereits mehrfach benutzte Zahlenbeispiel zugrunde, dann erhält man für die vier beschriebenen Faktoren Kraftstoffverbrauch, Zeit des Fahrers, Ölverbrauch und Reifenabrieb in Abhängigkeit von der Fahrstrecke M und der Fahrgeschwindigkeit x für die jetzt entscheidungsrelevanten Kosten die Funktion¹⁾

$$\begin{aligned} C_e^4(M, x) &= M \cdot \frac{\pi_1}{100} \cdot \left(\frac{1}{1250}x^2 - \frac{3}{50}x + 8 \right) \\ &+ M \cdot \frac{\pi_2}{x} \\ &+ M \cdot \frac{\pi_3}{100} \cdot \left[2 \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^2 - 1,9 \frac{x}{x_{\max}} + 0,55 \right] \\ &+ M \cdot \frac{\pi_4}{100 \cdot 1000} (0,00098096x^2 + 0,0054284x + 2,32) \text{ [DM];} \end{aligned}$$

für $x \leq \frac{1}{2}x_{\max}$ kann dabei im Rahmen der Optimierung der dritte Summand entfallen, weil der Ölverbrauch dann konstant und deshalb nicht entscheidungsrelevant ist.

¹⁾ Um alle vier Größen addierbar zu machen, wird auch der Ölverbrauch auf die Dimension l/100 km gebracht (statt l/1000 km).

Die aus der vorgenannten Kostenfunktion berechenbare optimale Fahrgeschwindigkeit muß folgende Gleichung erfüllen:

$$\frac{1}{100} \left[2 \left(\frac{\pi_1}{1250} + \frac{\pi_3 \cdot 1,9}{\pi_1 x_{\max}} - \frac{\pi_4}{1000\pi_1} \cdot 0,00098096 \right) x^3 \right] - \left(\frac{3}{50} + \frac{\pi_3 \cdot 1,9}{\pi_1 x_{\max}} - \frac{\pi_4}{1000\pi_1} \cdot 0,0054284 \right) x^2 = \frac{\pi_2}{\pi_1}$$

wobei für $x \leq \frac{1}{2}x_{\max}$ die Summanden, welche x_{\max} enthalten, wegzulassen sind.

Aus der vorgenannten Gleichung kann die optimale Fahrgeschwindigkeit bestimmt werden (wobei x_{\max} im vorliegenden Fall gleich 180 km/h ist). Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 17 wiedergegeben.

Ein Vergleich von Tab. 17 mit Tab. 2, die zur Erleichterung des Vergleichs in Tab. 17 als 1. Zeile (für $\pi_4 = \pi_3 = 0$) ebenfalls einbezogen worden ist, zeigt, daß die Berücksichtigung des Öl- und des Reifenverbrauchs die im Zwei-Faktoren-Fall als optimal ermittelten Fahrgeschwindigkeiten zwar etwas reduziert, aber nicht wesentlich. In keinem Fall erreicht die Reduktion 10 % der im Zwei-Faktoren-Fall optimalen Geschwindigkeit.

Dieser Sachverhalt legt die Vermutung nahe, daß auch die Berücksichtigung weiterer Faktoren die Ergebnisse des Zwei-Faktoren-Falls nicht grundlegend ändern wird. Dies um so mehr, als für die wichtigsten weiteren kostenbestimmenden Faktoren eines Kraftfahrzeugs eine direkte Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit kaum gegeben sein dürfte.

Die Wartungskosten z.B. sind primär von der Fahrstrecke und nicht von der Fahrgeschwindigkeit abhängig, weil für die Inspektionen von allen Automobilfirmen Intervalle vorgegeben werden, die entweder durch bestimmte Fahrstrecken (z.B. alle

Tabelle 17 Die optimale Fahrgeschwindigkeit (in km/h) eines Kraftfahrzeugs (vgl. "Musterbeispiel" in Tabelle 2) in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis π_1 , vom Lohnsatz π_2 , vom Ölpreis π_3 und vom Reifenpreis π_4 , wenn

$\pi_4 : \pi_1$ gleich	$\pi_3 : \pi_1$ gleich	und wenn $\pi_2 : \pi_1$ gleich ist								
		2 : 1	3 : 1	5 : 1	10 : 1	15 : 1	20 : 1	30 : 1	50 : 1	75 : 1
0.00	0.00	66.105	72.840	82.934	100.000	112.102	121.783	137.162	159.830	180.838
	2.00	"	"	"	99.901	111.927	121.550	136.840	159.381	180.274
	3.00	"	"	"	99.853	111.841	121.435	136.681	159.159	179.996
	4.00	"	"	"	99.804	111.755	121.321	136.523	158.939	179.720
	6.00	"	"	"	99.708	111.586	121.095	136.211	158.505	179.175
	10.00	"	"	"	99.521	111.255	120.654	135.603	157.657	178.113
40.00	0.00	64.372	71.037	81.010	97.847	109.776	119.316	134.467	156.791	177.477
	2.00	"	"	"	97.767	109.625	119.110	134.178	156.383	176.961
	3.00	"	"	"	97.728	109.551	119.009	134.035	156.181	176.706
	4.00	"	"	"	97.689	109.477	118.908	133.893	155.981	176.453
	6.00	"	"	"	97.612	109.330	118.709	133.612	155.585	175.953
	10.00	"	"	"	97.461	109.044	118.319	133.064	154.812	174.978
50.00	0.00	63.962	70.609	80.552	97.334	109.222	118.727	133.823	156.065	176.674
	2.00	"	"	"	97.259	109.076	118.528	133.542	155.666	176.168
	3.00	"	"	"	97.222	109.004	118.430	133.402	155.469	175.919
	4.00	"	"	"	97.185	108.933	118.332	133.264	155.273	175.671
	6.00	"	"	"	97.112	108.792	118.139	132.991	154.886	175.182
	10.00	"	"	"	96.969	108.515	117.760	132.456	154.130	174.226
60.00	0.00	63.561	70.190	80.104	96.831	108.677	118.150	133.191	155.352	175.884
	2.00	"	"	"	96.760	108.537	117.957	132.917	154.961	175.389
	3.00	"	"	"	96.725	108.468	117.861	132.781	154.769	175.144
	4.00	"	"	"	96.690	108.399	117.766	132.646	154.577	174.902
	6.00	"	"	"	96.621	108.263	117.579	132.380	154.199	174.423
	10.00	"	"	"	96.486	107.996	117.211	131.859	153.460	173.487
70.00	0.00	63.168	69.780	79.665	96.337	108.143	117.582	132.570	154.650	175.107
	2.00	"	"	"	96.270	108.008	117.395	132.303	154.269	174.622
	3.00	"	"	"	96.237	107.941	117.302	132.170	154.080	174.383
	4.00	"	"	"	96.204	107.875	117.210	132.039	153.893	174.146
	6.00	"	"	"	96.139	107.743	117.028	131.779	153.523	173.676
	10.00	"	"	"	96.011	107.486	116.672	131.271	152.800	172.759
100.00	0.00	62.035	68.597	78.395	94.909	106.596	115.938	130.770	152.616	172.853
	2.00	"	"	"	94.853	106.475	115.767	130.522	152.259	172.398
	3.00	"	"	"	94.825	106.415	115.683	130.400	152.082	172.172
	4.00	"	"	"	94.798	106.356	115.599	130.278	151.907	171.949
	6.00	"	"	"	94.743	106.238	115.432	130.037	151.561	171.507
	10.00	"	"	"	94.637	106.007	115.106	129.565	150.883	170.643
150.00	0.00	60.290	66.769	76.430	92.690	104.190	113.378	127.963	149.439	169.330
	2.00	"	"	"	92.650	104.089	113.231	127.744	149.118	168.918
	3.00	"	"	"	92.630	104.039	113.158	127.635	148.960	168.714
	4.00	"	"	"	92.610	103.989	113.085	127.528	148.802	168.511
	6.00	"	"	"	92.571	103.891	112.942	127.315	148.490	168.110
	10.00	"	"	"	92.494	103.698	112.660	126.897	147.879	167.325
200.00	0.00	58.701	65.100	74.629	90.649	101.972	111.017	125.370	146.499	166.067
	2.00	"	"	"	90.622	101.888	110.890	125.175	146.210	165.692
	3.00	"	"	"	90.609	101.847	110.827	125.079	146.067	165.506
	4.00	"	"	"	90.596	101.806	110.764	124.984	145.925	165.322
	6.00	"	"	"	90.569	101.724	110.639	124.794	145.643	164.956
	10.00	"	"	"	90.517	101.562	110.395	124.422	145.090	164.240

10 000 km) oder durch bestimmte Zeiten (mindestens einmal pro Jahr) definiert sind.

Die Wertminderung durch Absinken des Wiederverkaufspreises wird in der Regel durch das Alter und durch die Fahrleistung eines Kraftfahrzeugs bestimmt. Da für die Höhe der kalkulatorischen Zinsen das noch gebundene Kapital maßgebend ist, gilt für sie dasselbe.

Kraftfahrzeugsteuer und -versicherung sind fixe Kosten und deshalb nicht entscheidungsrelevant.

Es verbleibt dann eigentlich nur noch eine allerdings sehr wichtige aber auch nur ganz schwer faßbare Größe, welche die gewonnenen Ergebnisse wesentlich verändern kann: Die mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit steigende Unfallgefahr und die aus Unfällen resultierenden Kosten. Die Untersuchung dieser Kosteneinflußgröße würde jedoch eine weitere Analyse vom Umfang der hier vorgelegten erfordern.

Schlußbemerkungen

Im Anschluß an eine detaillierte Analyse der anstehenden Probleme in den Kapiteln 1 bis 3 hat die durchgeführte Untersuchung im Kapitel 4 praktische Ergebnisse geliefert, die sowohl für das Fahren von heute existierenden Kraftfahrzeugen als auch für die Konstruktion zukünftiger Kraftfahrzeuge von Bedeutung sind. Es konnte klar gezeigt werden,

1. daß eine Differenzierung der Kosten in fixe und variable Kosten nicht ausreicht, weil gerade den in bezug auf die Geschwindigkeit oder die Zeit variablen Kosten besondere Bedeutung zukommt,
2. daß die optimale Fahrgeschwindigkeit (Fahrzeit) dann, wenn das Verhältnis aus Lohnsatz und Kraftstoffpreis steigt, ebenfalls zunimmt (abnimmt) und sehr bald die maximale Fahrgeschwindigkeit übersteigt, daß also bei relativ steigendem Lohnsatz in erheblichem Umfang Arbeitszeit (und damit Beschäftigung) durch andere Faktoren (vor allem Werkstoffe) ersetzt wird, und zwar auf dem Wege über die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit (allgemein des Arbeitstempos),
3. daß also auch für limitationale Faktoren im Wege der Substitution von Zeit durch Geschwindigkeit in erheblichem Umfang periphere Substitution möglich ist,
4. daß die entscheidungsrelevanten Kosten pro gefahrenen Kilometer im Optimalbereich nicht allzu sensitiv auf Abweichungen von der optimalen Fahrgeschwindigkeit bzw. Fahrzeit reagieren.

In Kapitel 5 konnten kostentheoretische Sachverhalte aufgezeigt werden, welche den Zusammenhang zwischen der Kosteneinflußgröße Faktorpreise und der Kosteneinflußgröße Beschäftigung betreffen, wobei insbesondere die daraus folgenden Konsequenzen für die optimale Kombination von zeitlicher und intensitätsmäßiger Anpassung im Vordergrund der Analyse standen.

In Kapitel 6 konnte gezeigt werden, daß die zunächst für den Zwei-Faktoren-Fall nachgewiesenen Zusammenhänge auch im Vier-Faktoren-Fall gelten, so daß die Vermutung geäußert werden kann, daß sie auch bei Berücksichtigung weiterer Faktoren zutreffen.

Die Ergebnisse der Untersuchung werfen die Frage auf, zu welchen Resultaten man in anderen Bereichen, z.B. in der industriellen Produktion kommt, wenn man auch dort, wie hier geschehen, von empirischem Datenmaterial ausgehend, Erkenntnisse zu gewinnen sucht, die sowohl kostentheoretisch als auch praktisch verwertbar sind. Angesichts der heutigen Beschäftigungslage interessieren dabei natürlich besonders die Zusammenhänge zwischen der Höhe der Faktorpreise (vor allem der Löhne) auf der einen Seite sowie der Arbeitszeit (bzw. der Beschäftigung) und dem Arbeitstempo auf der anderen Seite. Dies zu erforschen, dürfte eine zwar sehr umfangreiche, aber auch eine lohnende und äußerst vielversprechende Aufgabe sein.