

INFORMATIONSTECHNISCHES PRAKTIKUM 1

Versuch 3: PC-gestützte Simulation linearer Zweitore und Filter

Fachgebiet: Nachrichtentechnische Systeme

Name:

Matr.-Nr.:

Betreuer:

Datum:



Die Vorbereitungsaufgaben sind vor dem Praktikumstermin zu lösen

1. Einleitung

Ziel dieses Praktikumsversuches ist die Einführung in den Einsatz eines Simulationsprogrammes zur Analyse von elektrischen Netzwerken. Verwendet wird dazu das weit verbreitete Simulationsprogramm SPICE. Dieses Programm gibt es für unterschiedliche Plattformen. Die wichtigsten sind UNIX (oder Klone) und MS-Windows. Diese Versionen weisen einige grundsätzliche konzeptionelle Unterschiede sowie unterschiedliche Funktionsbezeichner bei der Simulationsauswertung auf. Auf alle Differenzen kann im Rahmen dieser Praktikumsanleitung leider nicht eingegangen werden, da dies ihren Rahmen sprengen würde.

SPICE bietet ein weites Feld von Simulations- und Analysemöglichkeiten für elektrische Netzwerke. Die für Studenten der Elektrotechnik wichtigsten Analyseverfahren sind wohl:

- DC - Analyse Analyse über eine sich ändernde Gleichspannung (z.B. Transistorkennlinien)
- AC - Analyse Analyse über eine frequenzveränderliche Wechselspannung (Kleinsignalanalyse)
- Transiente Analyse Analyse über die Zeit (Einschaltvorgänge, Digitalschaltungen)
- Fourier Analyse Analyse von Frequenzspektren etc.

Für den vorliegenden Praktikumsversuch beschäftigen wir uns jedoch nur mit der AC-Analyse von passiven und aktiven Filtern.

2. Das SPICE - Grundkonzept

Die Beschreibung eines Netzwerkes für das Simulationsprogramm erfolgt in Textform. Dabei sind feste Syntaxregeln für die zu erstellende Textdatei zu beachten, so daß man die Netzwerkbeschreibung mit einer Programmiersprache vergleichen kann. Da SPICE mit der Knotenanalyse arbeitet, ist die Beschreibung an Knoten orientiert (Stellen gleichen Potentials zwischen den Bauteilen).

2.1 Gesamtformat der Textdatei

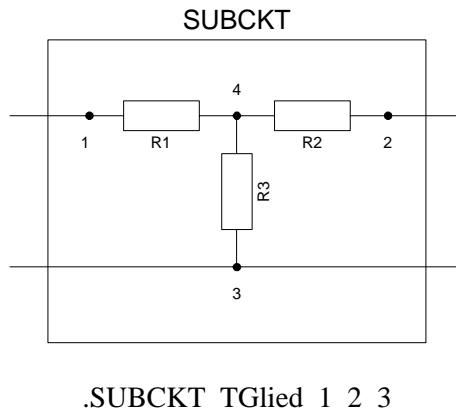
- Eine Netzwerkdatei beginnt immer mit einer beschreibenden Überschrift. SPICE ignoriert die erste Zeile der Datei beim Netzwerkaufbau völlig. Sie dient nur zur Identifikation der Datei beim Einladen der Simulationsdaten.
- Jedes Bauteil wird mit genau einer Textzeile eingefügt.
- Jede Zeile, die eine Bauteildefinition enthält beginnt mit dem Bauteilnamen. Der jeweilige Bauteilname beginnt mit einem Buchstaben, der das zu verwendende Bauteil festlegt (z.B. R für einen Widerstand). Danach folgen die Parameter für das Bauteil, welche durch Leerzeichen voneinander getrennt werden. Als erste Parameter folgen die Nummern der Knoten, zwischen denen das Bauteil eingesetzt wird, danach der Wert eines Bauteils und gegebenenfalls optionale Parameter.
- Jede Zeile, die eine Anweisung an das Simulationsprogramm enthält, beginnt mit einem Punkt, worauf die eigentliche Anweisung und evtl. ergänzende Parameter folgen.
- Eine Kommentarzeile beginnt mit einem Stern.
- Einer der Knoten des Netzwerkes muss die Nummer Null haben. Er dient als Referenzpunkt bei den Berechnungen. In der Regel wird man dafür Masse verwenden.
- Bauteilkombinationen bzw. wiederkehrende Teilnetzwerke können durch sog. Unterschaltkreise dargestellt werden. Diese Unterschaltkreise können dann wie Bauelemente in das Netzwerk eingesetzt werden.
- Bauteilnamen innerhalb eines Schaltkreises oder eines Unterschaltkreises müssen eindeutig sein.
- Eine Beschreibungsdatei endet mit der Anweisung „END“.

2.2 Unterschaltkreise

Ein Unterschaltkreis beinhaltet Bauteilzeilen, die genauso aufgebaut sind, wie solche in der Beschreibung des gesamten Netzwerkes. Die Knoten und Bauteilbezeichnungen eines Unterschaltkreises sind jedoch lokal, d.h. sie kollidieren nicht mit evtl. gleichen Knotennummern oder Bezeichnungen des Gesamtnetzwerkes (vergleichbar mit lokalen Variablen von Programmiersprachen z.B. in Prozeduren von Turbo-Pascal). Der Knoten Null darf jedoch nicht verwendet werden.

Der Unterschaltkreis steht zwischen zwei Zeilen, die ihn begrenzen. Eingeleitet wird er mit der Anweisung „SUBCKT“. Der SUBCKT-Anweisung folgt der Name des Unterschaltkreises und die lokalen Knoten, mit denen er nach „außen“ verbunden wird. Wenn der Unterschaltkreis im Netzwerk eingesetzt wird, müssen die Knoten in der so entstandenen Reihenfolge eingesetzt werden. Auch dies ist wieder vergleichbar mit einer Programmiersprache, z.B. Prozedurdeklarationen in Turbo-Pascal. Abgeschlossen wird ein Unterschaltkreis mit der Anweisung „ENDS“

Beispiel:



2.3 Bauteildefinitionen

Im Folgenden werden einige mögliche Bauteildefinitionen tabellarisch aufgelistet. Kn<x> sind dabei einzusetzende Knotennummern. „DefName“ bedeutet den Namen der Bauteildefinition (z.B. Name eines Unterschaltkreises), nicht zu verwechseln mit dem Namen des Bauteils im Schaltkreis!

Def	Bauteil	Syntax	Beispiel
R	Widerstand	R<Name> <Kn1> <Kn2> <Wert>	Ri 1 2 600Ohm
L	Induktivität	L<Name> <Kn1> <Kn2> <Wert>	L1 2 3 14.4mH
C	Kapazität	C<Name> <Kn1> <Kn2> <Wert>	C2 3 4 100nF
D	Diode	D<Name> <Kn1> <Kn2> <DefName>	D1 4 5 INT
Q	Transistor	D<Name> <Kn1> <Kn2> <Kn3> <DefName>	Q1 1 2 3 BC413B
X	Unterschaltkrei s	X<Name> <Kn1> <Kn2>... <DefName>	XG1 2 3 0 HP1
V	Spg. Quelle	V<Name> <Kn1> <Kn2> <Spezifikationen> Spez.: AC <Wert> DC <Wert> Signalformen (für dies Versuch nicht nötig!)	Vein 1 2 AC 1V

Tabelle 2.1- Bauelementdefinitionen unter SPICE

2.4 Bauteilwerte

Normalerweise muss im Gegensatz zu den Beispielen aus Tabelle 2.1 die Maßeinheit nicht angegeben werden, sondern nur die Größenordnung. Dafür stellt SPICE das folgende Größenordnungssystem zur Verfügung (wobei diese auch in exponentieller Schreibweise benutzt werden können):

Größenordnung	Exponentialschreibweise	Bezeichnung
T	E12	Terra
G	E9	Giga
MEG	E6	Mega
K	E3	Kilo
M	E-3	milli
U	E-6	mikro
N	E-9	nano
P	E-12	piko
F	E-15	femto

Tabelle 2.2 - Größenordnungssystem von SPICE

2.5 Veränderliche Bauteile

Veränderliche Bauteile (z.B. Potentiometer) bekommen statt eines Wertes einen Parameternamen, der in geschweifte Klammern gesetzt wird (z.B. R1 1 2 {Poti}). Dieser Name wird dann für die Simulationsanweisungen „PARAM“ und „STEP PARAM“ weiterverwendet.

2.6 Simulationsanweisungen

.PARAM und .STEP PARAM

Mit diesen Anweisungen wird ein veränderliches Bauteil beschrieben. Zuerst folgt die Festlegung eines Normalwertes für das Bauteil z.B.: .PARAM Poti = 10k
Danach erfolgt die Angabe, welche Werte für die Simulation durchlaufen werden sollen. Dabei gibt zwei Formate.

```
.STEP PARAM <Name> <Startwert> <Endwert> <Schrittweite>  
.STEP PARAM <Name> LIST <Wert1> <Wert2>...
```

Die Zeile .STEP PARAM Poti 100 1k 100 simuliert zehn verschiedene Stellungen für das Poti (von 100Ohm bis 1000Ohm in Schritten von 100 Ohm)

Die Zeile .STEP PARAM Poti LIST 100 500 1k simuliert exakt die drei angegebenen Stellungen.

.AC

Die AC-Anweisung dient zur Durchführung einer Kleinsignal-Wechselstromanalyse. Dabei gibt es auch hier unterschiedliche Formate. Im Rahmen dieses Praktikumsversuches interessieren uns jedoch nur zwei (linear und logarithmisch, siehe nächste Seite):

.AC LIN <Anzahl Schritte> <Startwert> <Endwert>

AC LIN 1000 1 10k simuliert 1000 Schritte für Frequenzen von 1Hz bis 10kHz.

.AC DEC <Schritte/Dekade> <Startwert> <Endwert>

AC DEC 100 1 1G simuliert 100 Punkte pro Zehnerpotenz von 1Hz bis 1GHz, also 900 Punkte.

Darüber hinaus gibt es noch etliche weitere Möglichkeiten der Analyse, die jedoch den Rahmen dieser kurzen Zusammenfassung bei weitem sprengen würden.

2.7 Konzeptionelle Probleme

Wie bereits erwähnt, arbeitet das Simulationsprogramm mit der Knotenanalyse. Dies führt zu zwei Problemen, welche bereits bei der Schaltungseingabe zu beachten sind.

- 1.) Von allen Knoten muß ein Gleichstromweg mit endlichem Widerstand zu Knoten Null existieren. Ist dies nicht der Fall, muß ein hochohmiger Hilfswiderstand, der die Schaltungseigenschaften nicht beeinflußt, gegen Knoten Null eingesetzt werden.
- 2.) Es dürfen keine aus Bauelementen gebildeten Maschen bestehen, deren Gleichstromwiderstand Null ist. In diesem Fall kann man mit einem niederohmigen Widerstand in der entsprechenden Masche Abhilfe schaffen.

2.8 Beispiel für eine korrekte SPICE - Netzwerkbeschreibung

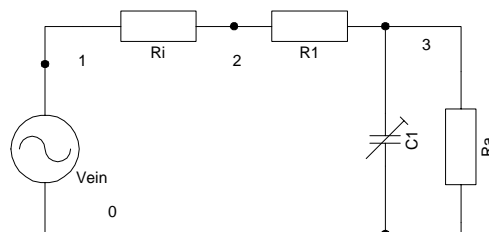


Bild 2.1 - Beispielnetzwerk: Tiefpaß 1. Ordnung mit Trimmer

```
Vein 1V
Ri 600Ohm
Ra 100kOhm
R1 1kOhm
C1 1nF, 5nF, 10nF, 15nF, 20nF
```

gewünschte Analyse: lineare Wechselstromanalyse in 150 Schritten von 1Hz bis 500kHz

Daraus ergibt sich die folgende Netzwerkbeschreibung:

*Passiver Tiefpass 1. Ordnung

```
Vein 1 0 ac 1
Ri 1 2 600
R1 2 3 1k
Ra 3 0 100k
C1 3 0 {Trimmer}
.PARAM Trimmer=20n
```

Fortsetzung =>

```
.STEP PARAM Trimmer LIST 1n 5n 10n 15n 20n  
.AC LIN 150 1 500k  
.END
```

3.0 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Auswertung erfolgt für den Praktikumsversuch in grafischer Darstellung. Dabei sind die Unterschiede zwischen der Windows- und der UNIX-Version jedoch erheblich.

3.1 Grafische Darstellung mit der Windows-Version

Die Darstellung der Simulationsergebnisse geschieht mit dem Programm PROBE. Wenn eine Schaltung mit SPICE simuliert worden ist, existiert danach eine Datei mit der Extension .DAT. Diese wird in PROBE eingelesen. Danach kann mit dem Menübefehl TRACE => ADD eine Auswertung zur Grafik hinzugefügt werden. Dabei gibt es verschiedene Syntaxformen für Spannungen und Ströme:

VM(<Kn1>,<Kn2>) bzw. IM(<Bauteil>)	Betrag
VP(<Kn1>,<Kn2>) bzw. IP(<Bauteil>)	Phase
VR(<Kn1>,<Kn2>) bzw. IR(<Bauteil>)	Realteil
VM(<Kn1>,<Kn2>) bzw. II(<Bauteil>)	Imaginärteil

Benutzt man nur V(<Kn1>,<Kn2>) bzw. I(<Bauteil>) ohne weitere Buchstaben, rechnet PROBE mit komplexen Vektoren. Diese können jedoch nicht dargestellt werden, deshalb wird bei der Darstellung der Betrag abgebildet.

Es können auch ganze Ausdrücke als Trace definiert werden. Dafür stehen die Grundrechenarten (+, -, *, /) und diverse Funktionen (siehe Tabelle 3.1) zur Verfügung. Bauteilwerte können nicht direkt verwendet werden, sondern müssen aus den Spannungen und Strömen berechnet werden.

Funktion	Bedeutung
ABS(<Ausdruck>)	Betrag eines Ausdrucks
SGN(<Ausdruck>)	Signum-Funktionswert eines Ausdrucks
SQRT(<Ausdruck>)	Wurzel
EXP(<Ausdruck>)	Exponentialfunktion
LOG(<Ausdruck>)	natürlicher Logarithmus
LOG10(<Ausdruck>)	Logarithmus zur Basis 10
M(<Ausdruck>)	Betrag (gleich mit ABS())
P(<Ausdruck>)	Phase
R(<Ausdruck>)	Realteil
IMG(<Ausdruck>)	Imaginärteil
PWR(<Ausd.1>,<Ausd.2>)	Ausdruck1 hoch Ausdruck2
SIN/COS/TAN(<Ausdruck>)	Trigonometrische Funktionen
d(<Ausdruck>)	Ableitung nach der x-Achsenvariable
AVG(<Ausdruck>)	Mittelwert über den gesamten Bereich der x-Achsenvariablen

Tabelle 3.1 - Die wichtigsten Funktionen von PROBE

3.2 Grafische Darstellung mit der UNIX-Version

Die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt mit dem PLOT - Anweisung (interaktiv in der SPICE - Shell). Als Parameter zu PLOT können genauso Ausdrücke übergeben werden wie in der Windows-Version, jedoch darf nicht explizit auf den Knoten Null zugegriffen werden. Hier wird dann einfach nur ein Knotenpotential angegeben (also z.B. V(1) statt V(1,0) - auch in der Windows-Version möglich). Außerdem können keine Ströme durch beliebige

Bauteile in den Auswertungstermen verwendet werden, sondern nur Ströme durch eine Spannungsquelle. Soll also ein Strom durch ein bestimmtes Bauteil ermittelt werden, so muß man bereits bei der Schaltungseingabe eine Quelle mit AC 0 und DC 0 vor diesem Bauteil einsetzen, welche dann als Strommeßpunkt benutzt wird.

Außer einem Auswertungs Ausdruck können dem PLOT-Befehl noch diverse Optionen, die die Ausgabeform beeinflussen, übergeben werden. Für diesen Praktikumsversuch sind jedoch nur die folgenden Optionen von Interesse:

- XLOG x-Achse logarithmisch
- YLOG y-Achse logarithmisch
- LOGLOG Beide Achsen logarithmisch

4.0 Vorbereitungsaufgaben

4.1 Berechnen Sie die Kapazität für einen LC-Hochpaß 1. Ordnung mit der Grenzfrequenz $f_g=3,8\text{kHz}$ und $L=14,4\text{mH}$ über die Resonanzfrequenz.

4.2 Erstellen Sie ein Schaltungsdatei, die den Hochpaß in Bild 4.1 beschreibt. Kommentieren Ihre Datei ausführlich. Die gerahmten Schaltungsteile sollen als ein Unterschaltkreis definiert werden, der zweimal aufgerufen wird. Nennen Sie den Unterschaltkreis HG1 und HG2.

Beachten Sie beim Einsetzen in die Schaltung, dass die richtigen internen und externen Knoten zusammenschaltet werden! Nennen Sie die beiden Halbglieder in der Schaltung XG1 und XG2.

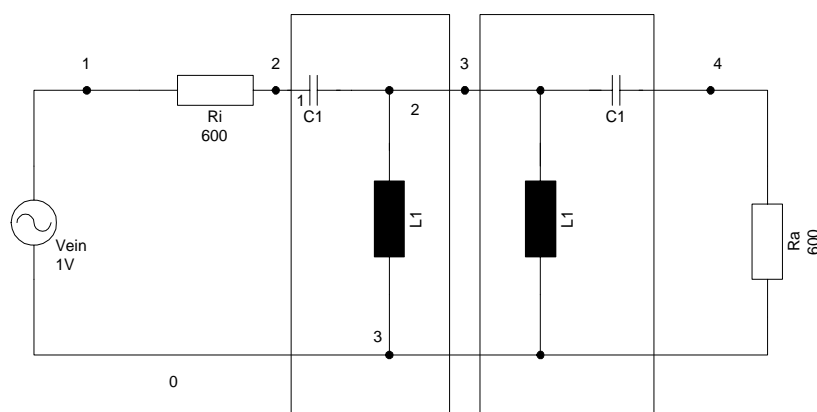


Bild 4.1 - Hochpaß 2. Ordnung

4.3 Warum lässt sich die Schaltung aus Bild 4.1 nicht ohne Abänderung mit SPICE analysieren. Wie können Sie Abhilfe schaffen?

- 4.4 Mit welchem Ausdruck für PROBE bzw. PLOT erhält man eine Ausgabe der Frequenzgänge von Betriebsdämpfungsfaktor $D_B = \frac{\hat{u}_0/2}{\hat{u}_2}$ und komplexen Betriebsdämpfungsmaß $\underline{g}_B = \ln \underline{D}_B$ der obigen Schaltung? Der Betriebsdämpfungsfaktor ist in Form des Betrags- und Phasenverlaufs, das komplexe Betriebsdämpfungsmaß in Form des Real- und Imaginärteils darzustellen. Der Zeiger \hat{u}_0 entspricht dabei der Spannungsquelle, \hat{u}_2 ist die Spannung an R_a .
- 4.5 In Bild 2.2 wurden die Übertragungsfunktionen eines RC-Tiefpasses für verschiedene Werte von C_1 dargestellt. Ordnen Sie die Werte von C_1 der jeweiligen Kurve zu.

5.0 Versuchsdurchführung

- 5.1 Führen Sie eine lineare Wechselstrom-Analyse des Hochpasses aus Aufgabe 4.2 im Bereich von 1Hz bis 20kHz in 500 Schritten durch. Stellen Sie die Übertragungsfunktion, g_B und g_W grafisch dar.

Für die folgenden Versuchsteile werden alle Simulationen im Bereich 10Hz - 1MHz logarithmisch mit 50 Schritten pro Dekade durchgeführt. Grafische Darstellungen erfolgen logarithmisch über die x-Achse.

- 5.2 Simulieren Sie die Schaltung aus Bild 5.1 und stellen Sie die Übertragungsfunktion dar. Welchen Einfluß haben R_3 und R_4 auf das Filter? Gesetzt den Fall, das Filter soll eine Verstärkung von eins aufweisen, wie vereinfacht sich die Schaltung?

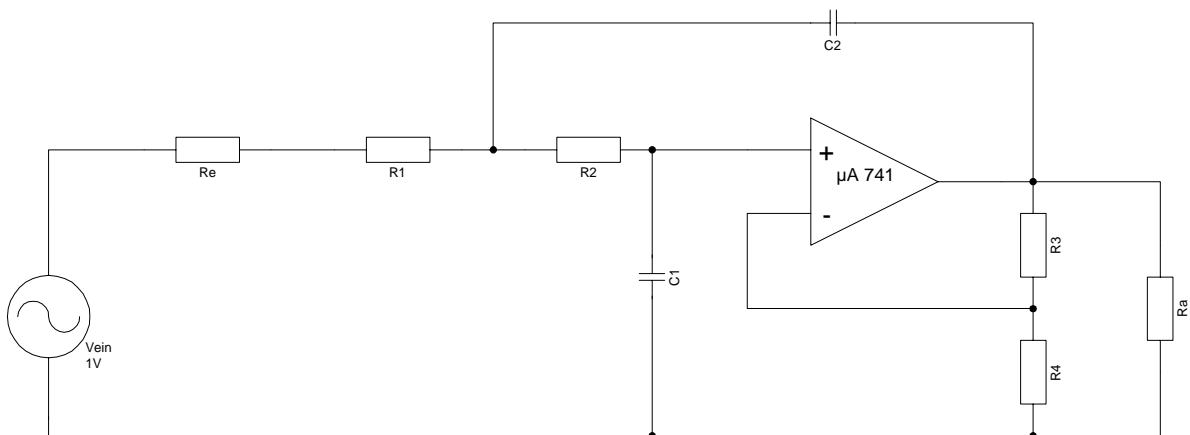


Bild 5.1 - Einfach mitgekoppelter Tiefpaß 2. Ordnung

- 5.3 Ermitteln Sie die Übertragungsfunktionen für $R_1=R_2$ mit den Werten 1k Ω , 10k Ω und 20k Ω . Vergleichen Sie die Ergebnisse miteinander.
- 5.4 Ändern Sie das Programm so ab, dass Sie einen Tiefpass dritter Ordnung erhalten. Benutzen Sie hierzu die Komponente $C_3 = 11\text{nF}$. Stellen Sie die Übertragungsfunktion dar und diskutieren Sie die wesentlichen Veränderungen im Vergleich mit der Übertragungsfunktion aus 5.2.
- 5.5 Wie erhält man grundsätzlich ein Hochpass dritter Ordnung aus der Schaltung in Bild 5.1? Stellen Sie dessen Übertragungsfunktion dar.
- 5.6 Gegeben ist der folgende Reaktanzbandpass

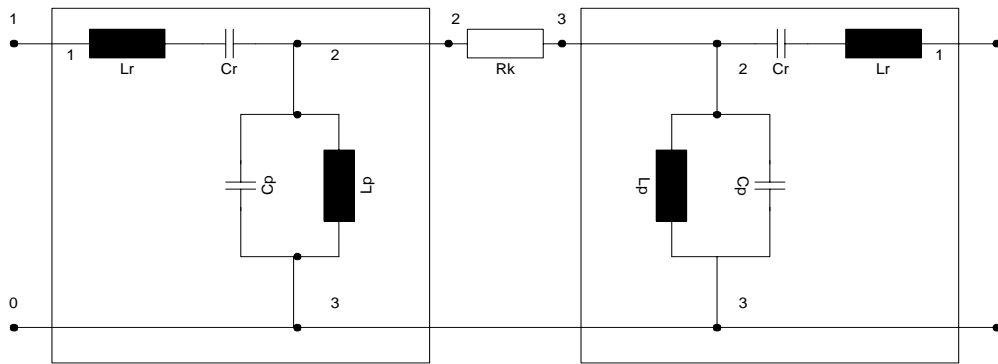


Bild 5.2 - Reaktanzbandpaß

Die Schaltung aus Bild 5.2 ergibt folgende Teilbeschreibung:

* Reaktanzbandpaß

* Halbglieddefinition

```
.SUBCKT HGLied 1 2 3
Lr 1 4 4.7mH
Cr 4 2 4.7nF
Lp 2 3 4.7mH
Cp 2 3 4.7nF
.ENDS
```

* Verschalten der Halbglieder

```
XG1 1 2 0 HGLied
Rk 2 3 1mOhm
XG2 4 3 0 HGLied
```

Simulieren Sie das Filter linear von 100Hz bis 100kHz und bestimmen aus der Kurve für das Betriebsdämpfungsmaß die Werte f_+ , f_- , Δf und f_0 (siehe Bild 5.3 auf der nächsten Seite)

Literatur zum Versuch

- [1] E.E.E Hoefler, H. Nerlinger SPICE - Analyseprogramm für elektronische Schaltungen
Springer-Verlag 1985
- [2] Duyan, Hahnloser, Traeger Design Center - PSpice für Windows
Teubner-Verlag 1994