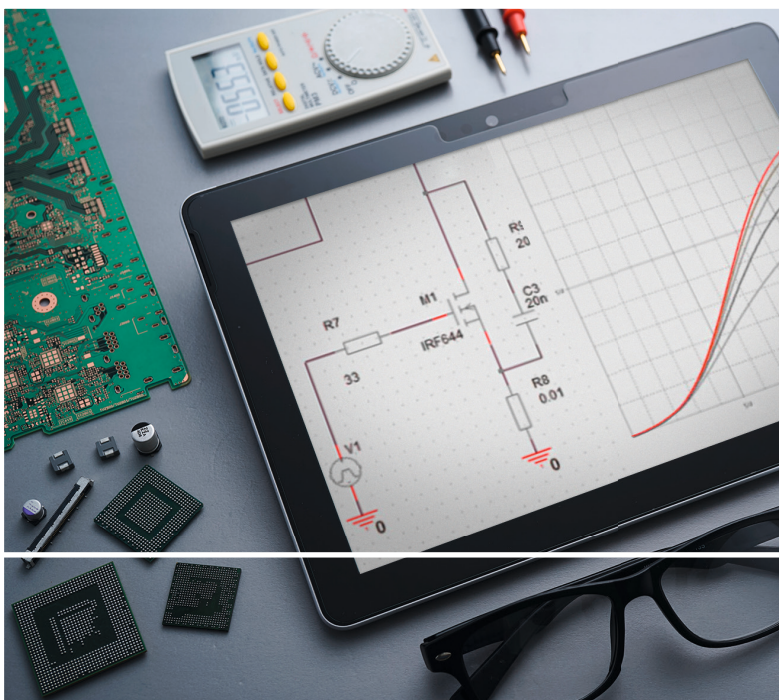


Thomas Zeh



# PSPICE

Einführung in die  
Elektroniksimulation



8., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER





#### Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-yyoqf-h t c c e

[plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de)



#### Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Unser **Computerbuch-Newsletter** informiert Sie monatlich über neue Bücher und Termine. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter:

[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)





Thomas Zeh

# PSpice

Einführung in die Elektroniksimulation

8., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

## Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Zeh, Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: Max Kostopoulos, unter Verwendung von Grafiken von © [shutterstock.com](http://shutterstock.com)/Syafiq Adnan

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46779-8

E-Book-ISBN 978-3-446-47148-1

E-Pub-ISBN 978-3-446-47575-5

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>0 SPICE und PSpice, Informationen auf <a href="http://plus.hanser-fachbuch.de">plus.hanser-fachbuch.de</a>, Software-Installation</b> .....	<b>7</b>
0.1 Die Entwicklung von PSpice und andere SPICE-Derivate .....	7
0.2 OrCAD PSpice Designer, OrCAD für Studierende, PSpice for TI .....	8
0.3 Zusatzinformationen auf <a href="http://plus.hanser-fachbuch.de">plus.hanser-fachbuch.de</a> .....	9
0.4 Softwareinstallation OrCAD PSpice Designer Lite 17.2 und Zusatzbibliotheken .....	10
0.5 Zahlenformate, Einheiten und Typografie .....	15
<b>1 Zeichnen von Schaltplänen</b> .....	<b>16</b>
1.1 Capture starten .....	16
1.2 Ein neues Projekt anlegen .....	17
1.3 Werkzeugleisten: Capture-, Draw- und PSpice-Toolbars .....	21
1.4 Bauteile finden und positionieren .....	23
1.5 Schaltpläne zeichnen .....	28
1.6 Bauteilattribute (Properties) editieren .....	37
1.7 Gleichstrom-Arbeitspunktanalyse der Reihenschaltung .....	42
1.8 Einheiten und Zahlenvorsätze in PSpice .....	45
1.9 Übungen .....	46

<b>2</b>	<b>Der PSpice-Workflow, Einstieg in die Simulation, Bias Point Analysis .....</b>	<b>48</b>
2.1	Basis- und Fortgeschrittene Analysen .....	48
2.2	Der PSpice-Workflow .....	50
2.3	Die Ausgabedatei *.out von PSpice (Output-File) und die Alias-Datei *.als .....	53
2.4	Gleichspannungen und -ströme im Arbeitspunkt: Bias Point Analysis ..	60
2.5	Nicht (sofort) simulierbare Schaltungen .....	70
	2.5.1 Simulationsmethode .....	70
	2.5.2 Einschränkungen der Lite-Version .....	74
2.6	Übungen .....	75
<b>3</b>	<b>PSpice als Software-Oszilloskop: Time Domain (Transient) Analysis .....</b>	<b>79</b>
3.1	Schaltplan und Parametrisierung der Transienten-Analyse .....	80
3.2	Probe-Diagramme darstellen. ....	85
3.3	Eine zweite y-Achse einfügen .....	91
3.4	Nutzung von Probe-Funktionen und -Operatoren. ....	93
3.5	Probe Dokumentation: Transient Simulation Report .....	100
3.6	Anzeigen von Effektivwert, arithmetischem Mittelwert, Gleichrichtwert und Leistungswerten .....	101
3.7	Schaltvorgänge .....	105
3.8	Übungen .....	108
<b>4</b>	<b>Die Wechselstrom-Analyse: AC Sweep/Noise Analysis .....</b>	<b>111</b>
4.1	AC-Analyse bei einer einzigen Frequenz .....	112
4.2	Frequenzgang-Analyse AC Sweep .....	119
	4.2.1 AC Sweeps mit linearen und logarithmischen Achsenskalierungen .....	120
	4.2.2 Lineare und logarithmische Verteilung der Datenpunkte .....	124
	4.2.3 Ergebnisse früherer Simulationen wieder zurückholen .....	129
	4.2.4 Diagramme verschiedener Simulationen gemeinsam darstellen ..	130
4.3	Übungen .....	132



<b>5</b>	<b>Gleichstromanalyse: DC Sweep Analysis</b>	<b>135</b>
5.1	Primary Sweep: Sweep mit einer Variablen	136
5.1.1	DC Sweep Voltage Source: Gleichspannungsquelle als Sweep-Variable	136
5.1.2	DC Sweep Current Source: Gleichstromquelle als Sweep-Variable	139
5.1.3	DC Sweep Temperature: Bauteiltemperatur als Sweep-Variable	146
5.1.4	DC Sweep Model Parameter: Modellparameter als Sweep-Variable	152
5.1.5	DC Sweep Global Parameter: Global-Parameter als Sweep-Variable	154
5.2	Secondary Sweep: Sweep mit zwei geschachtelten Variablen	162
5.2.1	Geschachtelter DC Sweep von zwei Global-Parametern	162
5.2.2	Geschachtelter DC Sweep von Temperatur und Modellparameter	164
5.3	Übungen	168
<b>6</b>	<b>Parametrische Analysen: Parametric Sweep</b>	<b>170</b>
6.1	Parametric Sweep im Rahmen eines DC Sweep	171
6.1.1	Brückenspannung $U_{AB}$ einer Temperaturmessbrücke: die Kurvenschar $U_{AB} = f(\vartheta)$ mit Temperaturkoeffizient $TCI$ als Parameter	171
6.1.2	Die Ausgangskennlinien eines MOSFET-Transistors: die Kurvenschar des Drainstroms $I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$ mit $V_{GS}$ als Parametric Sweep	175
6.2	Parametric Sweep im Rahmen eines AC Sweep	178
6.3	Der Parametric Sweep in der Transienten-Analyse, Faktoren als sweepbare Global-Parameter	183
6.4	Übungen	193
<b>7</b>	<b>Simulation in der Digitaltechnik</b>	<b>194</b>
7.1	Beschreibungsmodell eines digitalen Bauteils	194
7.2	PSpice als statischer Logik-Analysator	197
7.3	Dynamische Digitalsimulation: Zeitablaufdiagramme	204
7.3.1	Knotenbezeichnungen in der Digitalsimulation	204
7.3.2	Darstellung unbestimmter Schaltzeitpunkte im Probe-Fenster	208
7.3.3	Digital-Spannungsquellen	209
7.4	Zoom und Cursor in der Digitalsimulation	215

7.5	Digitale Stimulierung über einen Daten-Bus. . . . .	218
7.6	Zähler-Anwendungen, Tipps und Tricks . . . . .	222
7.6.1	Asynchrone Zähler . . . . .	222
7.6.2	Asynchroner BCD-Zähler. . . . .	224
7.6.3	Asynchroner BCD-Zähler mit dezimaler Ausgabe . . . . .	226
7.6.4	Hexadezimale Darstellung von Bitkombinationen . . . . .	227
7.6.5	Programmierung von Stimulusfolgen . . . . .	229
7.7	Parametrierung von Digital-Bauteilen . . . . .	231
7.7.1	Initialisieren von Flip-Flops . . . . .	231
7.7.2	Laufzeiten und deren Toleranzen. . . . .	233
7.7.3	Wahl des I/O-Levels . . . . .	240
7.8	Die Worst-Case-Analyse in der Digitaltechnik . . . . .	244
7.8.1	Überlappen von Ambiguity: Ambiguity Convergence Hazard. . . . .	245
7.8.2	Überlappen von Ambiguity: Cumulative-Ambiguity-Hazard. . . . .	253
7.8.3	Nichteinhalten von Grenzwerten: Timing-Violations. . . . .	255
7.9	Übungen . . . . .	261
<b>8</b>	<b>Anpassungen, Operatoren und Funktionen von Probe. . . . .</b>	<b>267</b>
8.1	Anpassung des Probe-Fensters . . . . .	267
8.1.1	Farbe und Linienbreite der Probe-Diagramme ändern . . . . .	268
8.1.2	Das Menü VIEW. . . . .	270
8.1.3	Alternative Ansichten des Bildschirminhalts: Alternate Display . . . . .	272
8.1.4	Multi-Windows-Fähigkeit von PSpice und CAPTURE. . . . .	273
8.2	Skalieren der X-Y-Achsen . . . . .	276
8.3	Operatoren und Funktionen in Probe anwenden . . . . .	277
8.4	Diagramme entflechten mit Add Plot. . . . .	279
8.5	Die Werkzeugleisten von Probe . . . . .	281
8.6	Ausschnittvergrößerungen . . . . .	283
8.7	Der Probe-Cursor . . . . .	284
8.8	Messfunktionen: Evaluate Measurement . . . . .	290
8.9	Übungen . . . . .	292

<b>9</b>	<b>Erweiterte Analysen: Fourier, Rauschgrößen, Performance, Arbeitspunkt, Monte-Carlo und Worst-Case</b> .....	<b>298</b>
9.1	Die Fourier-Analyse .....	298
9.1.1	Das Frequenzspektrum einer Rechteckspannung .....	299
9.1.2	Frequenzspektrum der Ausgangsspannung eines Verstärkers ...	305
9.2	Rauschanalyse .....	311
9.2.1	Ursache und Beschreibung von Rauschsignalen .....	311
9.2.2	Rauschanalyse einer Emitterschaltung .....	318
9.3	Performance-Analyse .....	325
9.4	Hilfsmittel zur Festlegung und Analyse des Arbeitspunktes .....	335
9.4.1	Die Bias-Point-Detail-Analyse .....	335
9.4.2	Die Transfer-Analyse .....	335
9.4.3	Die DC-Sensitivity-Analyse .....	336
9.5	Die Monte-Carlo-Analyse .....	337
9.6	Die Worst-Case-Analyse .....	347
9.6.1	Überblick über den Aufbau der Worst-Case-Analyse .....	348
9.6.2	Ermittlung des Worst Case eines aktiven Filters .....	350
9.7	Übungen .....	355
<b>10</b>	<b>Analoge Verhaltensbeschreibung: Analog Behavioral Modeling ABM</b> .....	<b>356</b>
10.1	Anwendungen .....	356
10.2	ABM-Funktionen und Bauteile .....	357
10.3	Mit mathematischen Funktionen arbeiten: Attribut EXPR .....	361
10.4	Arbeiten mit Tabellen: Attribut TABLE .....	365
10.5	Es wird komplex: Laplace-Gleichungen mit LAPLACE, ELAPLACE und GLAPLACE .....	367
<b>11</b>	<b>Anwendungen in der analogen und digitalen Schaltungstechnik, Leistungselektronik und Regelungstechnik</b> .....	<b>371</b>
11.1	Analoge Schaltungstechnik .....	371
11.1.1	Einstufige Transistorverstärker .....	371
11.1.2	Hi-Fi-Verstärker mit MOSFET-Endstufe .....	376

11.1.3	Transistoren in Schaltanwendungen . . . . .	382
11.1.4	Schaltungen mit Operationsverstärker . . . . .	390
11.2	Leistungselektronik . . . . .	395
11.2.1	Gesteuerte Thyristorbrücken . . . . .	395
11.2.2	Blindleistungskompensation im Dreiphasennetz . . . . .	399
11.3	Digitale und Mixed-Mode-Schaltungen . . . . .	402
11.3.1	Analog-Digitalwandler und Digital-Analogwandler . . . . .	402
11.3.2	Synchroner Modulo-x-Zähler . . . . .	415
11.4	Regelungstechnik . . . . .	416
11.4.1	Reglerparameter . . . . .	417
11.4.2	P-Regelung . . . . .	417
11.4.3	I-Regelung . . . . .	418
11.4.4	PI-Regelung . . . . .	419
11.4.5	PID-Regelung . . . . .	420
<b>12</b>	<b>Elektrische Stressanalyse: Smoke Analysis. . . . .</b>	<b>422</b>
12.1	Die Belastungsgrenzen eines Bauteils: Smoke Parameter . . . . .	423
12.2	Sorgt für gezielte Unterlast: Derating . . . . .	431
<b>13</b>	<b>Modelle einbinden. . . . .</b>	<b>439</b>
13.1	Grundsätzliches über SPICE/PSpice-Modelle . . . . .	439
13.2	Modell-Bibliotheken an- und abmelden . . . . .	443
13.3	Symbol-Bibliotheken an- und abmelden . . . . .	445
13.4	Modelle an Symbole anbinden . . . . .	447
13.5	Neue PSpice-Modelle einbinden mit Symbolen aus <i>discretes2005.olb</i> . . .	449
13.6	<i>discretes2005.olb</i> : Symbole für importierte Modelle . . . . .	454
13.7	Neue PSpice-Modelle und -Symbole einbinden mithilfe des Model Editors . . . . .	465
13.8	Erstellen von neuen Bauteilsymbolen mit der Funktion <b>Generate Part</b> . . .	470
13.9	Übungen . . . . .	472

<b>Anhang</b> .....	<b>474</b>
Handbücher.....	474
Die Farben des Probe-Bildschirms ändern .....	475
Übersicht Tastaturbefehle (Shortcuts).....	475
Probe: mathematische Operatoren und Funktionen.....	480
Bauteil-Liste der Bibliothek <i>eeval.olb</i> auf <a href="http://plus.hanser-fachbuch.de">plus.hanser-fachbuch.de</a> .....	484
Bauteil-Liste der Bibliothek <i>misc.olb</i> bzw. <i>sample.lib</i> auf <a href="http://plus.hanser-fachbuch.de">plus.hanser-fachbuch.de</a> .....	484
Die Spannungsquellen für die Transienten-Analyse .....	484
Die Messgeräte in <i>misc.olb</i> .....	489
Die Schalter aus <i>misc.olb</i> .....	490
Die Drehstromquelle aus <i>misc.olb</i> .....	494
Die regelungstechnischen Bausteine aus <i>misc.olb</i> .....	495
Zusatzmodelle auf <a href="http://plus.hanser-fachbuch.de">plus.hanser-fachbuch.de</a> .....	502
Weiterführende Informationen und Literaturliste .....	503
<b>Index</b> .....	<b>505</b>



# Vorwort

*Essentially, all models are wrong, but some are useful!*

*George Edward Pelham Box*

In der Geschichte der Elektrotechnik gab es nur wenige Innovationen, von denen die Arbeit der elektronischen Schaltungsentwicklung so stark beeinflusst wurde, wie die Einführung von SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) bzw. PSpice (*Personal SPICE*). Seit der Einführung von PSpice genügt ein handelsüblicher PC, um das Betriebsverhalten komplexer elektronischer Schaltungen im Detail zu simulieren.

Der Grad der Übereinstimmung zwischen Simulation und realer Schaltung steht und fällt mit der Qualität der Simulationsmodelle und der Berücksichtigung von Randbedingungen wie beispielsweise Umgebungstemperatur oder Streuung von Bauteilwerten. Hier gibt es in den vergangenen Jahren zwei Trends zu beobachten: Zum einen wurde PSpice ständig weiterentwickelt und durch neue Analysen erweitert. Zum anderen erkannten Hersteller von elektronischen Bauteilen, dass die Verfügbarkeit von hochwertigen Simulationsmodellen die Entwicklungszeit von Baugruppen deutlich verkürzen hilft. Probleme einer Schaltung können frühzeitig erkannt und bereits in der Entwicklung berücksichtigt werden. Damit wird die Verfügbarkeit von hochwertigen Simulationsmodellen zu einem Marktvorteil gegenüber anderen Herstellern. Ein Zeichen für diese Entwicklung ist die Kooperation des Bauteilherstellers Texas Instruments Inc. (TI) mit der Firma Cadence Design Systems Inc., aus der das Produkt *PSpice for TI* hervorgegangen ist, oder auch die Weiterentwicklung und Pflege des Simulators *LTspice* durch den Bauteilhersteller Analog Devices Inc.

Das oben angeführte Zitat „Essentially, all models are wrong, but some are useful“ bezog George Box, der britische Professor der Universität Wisconsin, zunächst auf statistische Modelle. Seine Aussage wurde im Nachgang auf andere wissenschaftlich-technische Modellierungen und Simulationen erweitert. Sinngemäß seien ihrem Wesen nach alle Modelle und Simulationen falsch, da sie die Wirklichkeit nur bis zu einem gewissen Grad abbilden. Aber dennoch sind Modellierung und Simu-

lation hilfreich und notwendig, auch wenn sie keine perfekte Abbildung der Wirklichkeit liefern. Eine Simulation oder ihr Modell ist dann „valide“, wenn die Eignung für eine konkrete Zielsetzung erfüllt ist. Die Erfahrungen des Autors haben gezeigt: Wenn eine Schaltung in der Simulation zum gewünschten Ergebnis führt, dann kann die Schaltung auch in der Praxis funktionieren, muss sie aber nicht zwangsläufig. Denn die Realität ist bei der Erzeugung von Problemen und Hindernissen sehr erfindungsreich! Und das ist genau das interessante Spannungsfeld, in dem sich ein:e Elektroniker:in befindet. Bei der Inbetriebnahme von Schaltungen in der Praxis können sich beispielsweise Kopplungen von Störsignalen auf Leitungen, unvorhergesehene Spannungs- und Stromeinbrüche oder nicht spezifiziertes Temperaturverhalten als Problem herausstellen. In der Praxis versucht man in diesen Fällen, das Simulationsmodell zu verfeinern. Im Umkehrschluss könnte formuliert werden: Zeigt eine Schaltung in der Simulation nicht das gewünschte Ergebnis, dann wird sie dies mit großer Sicherheit auch nicht in der Praxis tun.

Für professionelle Schaltungsentwickler:innen, in der Maker-Szene und für Hobbyisten sind Simulationsprogramme elektronischer Schaltungen zum unverzichtbaren Werkzeug geworden. Es gibt davon eine ganze Reihe, fast alle sind Weiterentwicklungen des legendären Programms SPICE, das an der Universität Berkeley entwickelt wurde. PSpice markiert unter diesen Programmen immer noch eindrucksvoll den Standard, auch wenn an leistungsfähigen Alternativen gearbeitet wird.

Das Buch erhebt den Anspruch, eine Einführung in PSpice zu geben, die dem oder der interessierten Elektroniker:in Freude bereitet. Der PSpice-Lehrgang dieses Buches besteht aus überschaubaren und in sich abgeschlossenen Abschnitten. Die Beispielschaltungen, mit denen Sie die PSpice-Simulation kennenlernen, sind in der Regel typische Schaltungen der elektrotechnischen Grundlagen. Auf diese Weise können Sie die Ergebnisse der Simulation jederzeit selbst auf Richtigkeit überprüfen und so das nötige Vertrauen in Ihre eigene Arbeit sowie in die Arbeit von PSpice gewinnen. Dieses Vertrauen benötigen Sie z. B. bei der Analyse größerer nichtlinearer elektronischer Schaltungen, bei denen die Simulationsergebnisse oftmals auch dem oder der routinierten Elektroniker:in nicht auf den ersten Blick einleuchten. Trotzdem sollten Sie Simulationsergebnisse stets kritisch hinterfragen. Liegt beispielsweise die Stromstärke durch ein Bauteil statt im erwarteten Milliampere-Bereich bei mehreren Kiloampere, dann ist vermutlich etwas an der Simulation faul und nicht an Ihrer Vorstellung! Die Gründe können vielfältig sein: Wurde lediglich ein Widerstandswert von Megaohm fälschlicherweise mit „m“ statt „meg“ angegeben oder ist vielleicht das Simulationsmodell des Bauteils fehlerhaft?

In der Lite-Version von PSpice werden bereits ca. 300 Symbolbibliotheken mitgeliefert. Schaltzeichen und Symbole folgen dabei dem amerikanischen *IEEE Std 315* Standard. Speziell für das Buch wurden Schaltzeichen nach den internationalen, in Europa gebräuchlichen Normen *IEC 60617* bzw. *DINEN 60617* entwickelt und wer-



den auf [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) zur Verfügung gestellt. Die Schaltpläne des Buches lassen sich auch mit amerikanischen Symbolen zeichnen, in einigen Beispielen wurden diese Symbole ausschließlich verwendet.

In diesem Buch wird folgender „Spagat“ versucht: Es soll gleichzeitig Einführungslehrgang für den Einsteiger, angemessene Hilfe für den Fortgeschrittenen und Nachschlagewerk für Einsteiger und Fortgeschrittene sein. Diesem Anspruch soll die folgende Gliederung des Buches dienen:

- Der erste Teil mit den Kapiteln 1 bis 7 vermittelt Grundlagen und richtet sich an Einsteiger:innen. In diesem Teil soll durch viele Schritt-für-Schritt-Aktionen die Vorgehensweise transparent und einfach nachvollziehbar werden. Nach sorgfältigem Durcharbeiten beherrschen Sie die wichtigsten Analysearten und können PSpice sinnvoll nutzen.
- Der zweite Teil mit den Kapiteln 8 bis 13 vermittelt Detailkenntnisse und richtet sich an fortgeschrittene Leser:innen bzw. an diejenigen, die den ersten Teil bearbeitet und daran anschließend bereits einige Erfahrungen in der Anwendung von PSpice gewonnen haben. Folglich wird zur besseren Übersichtlichkeit in vielen Fällen auf die detaillierten Schritt-für-Schritt-Aktionen verzichtet und ein Schwerpunkt auf Anwendungen gelegt.

Mit den Kenntnissen, die Sie durch das Studium dieses Buches erwerben, sind Sie hoffentlich gut vorbereitet, um PSpice erfolgreich für Grundsaltungen der elektronischen Schaltungstechnik in Ausbildung, Studium und beruflicher Praxis einsetzen zu können.

Allen Kolleginnen und Kollegen, Studierenden und Leser:innen, deren Anregungen dabei eingeflossen sind, sei herzlich gedankt. Meinem geschätzten Kollegen Prof. Dr. Frank Fischer danke ich herzlich für die kritische Durchsicht des Manuskripts! An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Frau Christina Kubiak und Herrn Frank Katzenmayer und ihrem Team vom Carl Hanser Verlag für die hervorragende Unterstützung und stets motivierende, vertrauensvolle Zusammenarbeit bei der Überarbeitung des Buches bedanken! Mein Dank geht an die Firma Cadence Design Systems Inc. und dem Distributor FlowCAD GmbH, die im Rahmen des OrCAD-Studierendenprogramms gebührenfrei eine professionelle Vollversion des OrCAD PCB Designers mit dem PSpice Simulator anbieten. Ebenso danke ich für die Genehmigung, den Leser:innen die PSpice-Lite-Version zur Verfügung stellen zu können.

Eine Herzensangelegenheit ist mein Dank an meine Familie und besonders an meine Frau Evelyn für ihre Geduld und Unterstützung!

*München, im September 2022*

*Thomas Zeh*

## Überarbeitung der achten Auflage

Die Resonanz auf die bisherigen Auflagen hat das Konzept des Autors Robert Heinemann eindrucksvoll bestätigt. In meiner beruflichen Praxis in der Industrie und Hochschule habe ich sein Buch bei der Anwendung von PSpice außerordentlich schätzen gelernt. Seit dem Erscheinen der siebten Auflage sind nun über elf Jahre vergangen und sowohl PSpice als auch die Computertechnik haben sich signifikant weiterentwickelt. Die der siebten Auflage zugrunde liegende PSpice-Version 16.0 wird von den aktuellen Windows-Versionen nicht mehr unterstützt. Umso mehr habe ich mich gefreut, dass Herr Heinemann sofort bereit war, mein Anliegen zur Überarbeitung des Buches zu unterstützen. Für diese Bereitschaft und Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken.

Die Neuauflage des Buches basiert auf der Version OrCAD PSpice 17.2 Lite, welche unter [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) heruntergeladen werden kann. Die Version 17.2 ist bisher die letzte Lite-Version von PSpice. Für die aktuelle Version 17.4 wurde das Lizenzmodell umgestellt: Für Studierende gibt es im Rahmen des OrCAD-Studentenprogramms gebührenfrei eine professionelle Vollversion. Den kommerziellen Kunden steht vor der Kaufentscheidung eine zeitlich limitierte „Free Trial“-Option zur Verfügung. In der Version 17.4. wurden neben einigen Verbesserungen die Menüstruktur und das Erscheinungsbild von OrCAD PSpice modernisiert. Nutzer:innen der Version 17.2 werden sich schnell in der neuen Version zurechtfinden und die Schaltungsbeispiele des Buches simulieren können. Für einige Leser:innen dürfte auch die Nutzung des Produkts *PSpice for TI* interessant sein, für welches bei Texas Instruments Inc. eine gebührenfreie Lizenz angefordert werden kann. Zur Nutzung und zum Funktionsumfang von *PSpice for TI* finden Sie Details im Einführungskapitel.

Für die achte Auflage wurde das Buch grundlegend überarbeitet. Die bisherige Dreiteilung aus „Grundlagen“, „Hohe Schule“ und „Einblicke sowie Anwendungen“ wurde zugunsten einer Zweiteilung aus den Grundlagenkapiteln 1–7 und den Aufbaukapiteln 8–13 aufgehoben. Dabei wurden gleichartige Themen aus separaten Kapiteln zu einem Kapitel zusammengeführt wie beispielsweise

- *Digitaltechnik 1* und *Digitaltechnik 2* zum neuen Kapitel 7 *Simulation in der Digitaltechnik*,
- *Anwendungen 1*, *Anwendungen 2* und *Regelungstechnik* zu einem umfangreichen Kapitel 11 *Anwendungen in der analogen und digitalen Schaltungstechnik, Leistungselektronik und Regelungstechnik*. Hinzugekommen sind Schaltungen der Verstärkertechnik, Schaltanwendungen und lineare Spannungsregler.

Sämtliche Kapitel der vorherigen Auflage wurden auf PSpice 17.2 aktualisiert. Neu hinzugekommene Themen sind beispielsweise in

- Abschnitt 2.2 *Der PSpice-Workflow*,
- Abschnitt 2.5 *Schaltungen, die sich nicht (sofort) simulieren lassen*,

- Abschnitt 7.1 *Beschreibungsmodell eines digitalen Bauteils*,
- Kapitel 8 *Anpassungen, Operatoren und Funktionen von Probe*,
- Kapitel 9 *Erweiterte Analysen: Fourier, Rauschgrößen, Performance, Arbeitspunkt, Monte-Carlo und Worst-Case*,
- Kapitel 10 *Analoge Verhaltensbeschreibung: Analog Behavioral Modeling ABM*,
- Kapitel 12 *Elektrische Stressanalyse: Smoke Analysis*

zu finden. Die für die Schaltungen benötigten Bauteile werden nun in übersichtlichen Listen mit Referenzen zu den Bibliotheken zusammengefasst.

In der Praxis hat die Bestimmung von Rauschgrößen in elektronischen Schaltungen eine wichtige Bedeutung. Dieses Thema ist zugegebenermaßen nicht ganz einfach zu erfassen, aber PSpice erleichtert die Arbeit. Im neuen Abschnitt *Ursache und Beschreibung von Rauschsignalen* in Kapitel 9 werden Rauschgrößen und deren Verwendung in PSpice im Detail diskutiert. Der Vergleich von mathematischen Berechnungen mit den Simulationsergebnissen soll ein besseres Verständnis schaffen, die Rauschparameter in PSpice zu durchblicken und diese in der Praxis anzuwenden.

Mit der analogen Verhaltensbeschreibung (Analog Behavioral Modeling, kurz ABM) bietet PSpice eine mächtige Funktionserweiterung, mit der sich Bauteile, Ströme und Spannungen mittels mathematischer Funktionen oder gesteuerten Quellen beschreiben lassen. Das neue Kapitel 10 *Analoge Verhaltensbeschreibung: Analog Behavioral Modeling ABM* soll beim Einsatz von ABM unterstützen.

Nachdem sich mit PSpice Spannungen, Ströme und Leistungen sehr genau simulieren lassen, liegt es nahe, die vom Bauteilhersteller vorgegebenen Belastungsgrenzen der Simulation hinzuzufügen und das Simulationsergebnis auf Einhaltung der Grenzen zu überprüfen. Genau dies erledigt die *Smoke Analysis*, die im neuen Kapitel 12 *Elektrische Stressanalyse: Smoke Analysis* erläutert wird. Mit der *Smoke Analysis* können gezielt Belastungsgrenzen reduziert werden. In der Industrie kennt man das Verfahren als *Derating* (Herabsetzung, Unterlastung). Es ist mittlerweile eine Standardprozedur bei der Entwicklung von Elektronik mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen.

Für Kommentare und Anregungen zum Buch bin ich stets dankbar, bitte nutzen Sie hierfür die E-Mail-Adresse [zeh.spicelab@web.de](mailto:zeh.spicelab@web.de). Auf [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) finden Sie neben den Zusatzmaterialien auch ein Korrekturverzeichnis (Errata). Ich würde mich freuen, wenn auch die achte Auflage des Buches eine gute Unterstützung bei der Schaltungssimulation für Sie ist und Ihnen interessante Einblicke sowie Freude beim Lesen und bei der Bearbeitung ermöglicht!

*München, im September 2022*

*Thomas Zeh*

## ■ Robert Heinemann zur Neuauflage des Buches

Die 7. Auflage dieses Buches habe ich erstellt, als ich schon lange die Altersgrenze überschritten hatte. Die Arbeit an dem Buch machte mir zwar immer noch viel Freude, aber meine Kräfte hatten nachgelassen, so dass ich für mich beschloss, keine neue Auflage mehr zu erstellen. Als Prof. Zeh vorschlug, das Buch neu herauszugeben, habe ich begeistert zugestimmt. Ich wünsche Prof. Zeh und dem Buch viel Erfolg und noch viele Auflagen.

*Braunschweig, im September 2022*  
*Robert Heinemann*

# 0

## SPICE und PSpice, Informationen auf [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de), Software-Installation

### ■ 0.1 Die Entwicklung von PSpice und andere SPICE-Derivate

PSpice basiert auf dem Schaltungssimulator SPICE, einer Software zur Simulation analoger, digitaler und gemischter Schaltungen. Im April 1973 präsentierte Prof. Donald O. Pederson mit seinem Doktoranden Laurence W. Nagel auf dem *Midwest Symposium on Circuit Theory* in Waterloo/USA den Konferenzbeitrag *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE)*. Das am Department EECS der University of California (Berkeley) entwickelte Programm umfasste damals 15000 Fortran- und Assembler-Statements und wurde auf dem Rechner CDC 6400 der Control Data Corporation ausgeführt. Im gleichen Jahr implementierte ein Student das Programm SPICE auf dem Rechner DEC 1020 der damaligen Fachhochschule Furtwangen, der heutigen Hochschule Furtwangen HFU. Zwei Jahre später veröffentlichte Laurence W. Nagel seine Dissertation mit dem Titel *SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits*. Unter anderem führte die Veröffentlichung des Programm-Quelltexts und die damit gegebene Möglichkeit der Weiterentwicklung zu einer großen Verbreitung und Popularität von SPICE. Bis heute steht der C-Quelltext der Version SPICE 3f5 auf den Internetseiten der University of California frei zur Verfügung.

Zurück zur Geburtsstunde von PSpice:

- Im Jahr 1984 gründeten Wolfram Blume und Paul Tuinenga die Firma MicroSim.
- Im Jahr 1984 stellte die Firma MicroSim das kommerzielle Programm PSpice für den PC von IBM vor. Das „P“ in Personal Computer gab PSpice dabei seinen Namen.
- Im Jahr 1985 wurde die grafische Analyseoberfläche Probe für PSpice eingeführt. PSpice wurde nun intensiv weiterentwickelt und es folgten regelmäßig neue Releases.

- Im Jahr 1997 führte MicroSim das Release 8.0 PSpice A/D ein. Seit dem Release 6 wird zur Erstellung der Schaltpläne der Editor MicroSim Schematics genutzt, in den PSpice voll integriert ist. Die mühsame textbasierte Eingabe der PSpice-Netzlisten und -Simulatoranweisungen konnte damit entfallen. PSpice wurde Teil des integrierten EDA (Electronic Design Automation)-Programm Pakets DesignLab, welches weitere Tools, z. B. für das FPGA-Design oder zum Board-Layout enthielt.
- Im Jahr 1998 fusionierten MicroSim Corporation und der EDA-Hersteller OrCAD. Der Schaltplaneditor OrCAD Capture erhielt eine Schnittstelle zu PSpice. Auch der ursprüngliche Editor MicroSim Schematics wurde noch in etlichen, nachfolgenden Releases von PSpice unterstützt.
- Im Juli 1999 wurden das Unternehmen OrCAD und seine Produkte von Cadence Design Systems übernommen, welches bis heute PSpice pflegt und weiterentwickelt.
- Im Jahr 2020 stellten Cadence Design Systems und Texas Instruments die in Zusammenarbeit entwickelte Version PSpice for TI vor. Im Vergleich zum kostenpflichtigen PSpice Designer Plus hat diese Version einen etwas reduzierten Funktionsumfang. Ein Vorteil ist die Nutzung der Referenzdesigns von Texas Instruments, falls keine separate PSpice-Lizenz von Cadence vorhanden ist.

PSpice blieb nicht das einzige, auf SPICE basierende Produkt. Als Beispiele seien genannt:

- LTspice von Analog Devices Inc. („LT“ wegen der Übernahme von Linear Technology Inc.),
- TINA-TI von Texas Instruments,
- Multisim von National Instruments,
- ngspice, Open-Source-Projekt,
- HSPICE von Synopsys,
- spice3 der University of California, häufig referenziert als Version „3F5“.

## ■ 0.2 OrCAD PSpice Designer, OrCAD für Studierende, PSpice for TI

Die Anleitungen und fast alle Schaltungen dieses Buches basieren auf dem Softwarepaket OrCAD PSpice Designer in der Version Lite 17.2. Die Version 17.2 ist die bislang letzte Version, für die eine kostenfreie Lite-Variante erstellt wurde. Mit freundlicher Genehmigung von Cadence Design Systems können Sie sich das Pro-

grammpaket unter *plus.hanser-fachbuch.de* nach Eingabe des Codes auf der ersten Seite des Buchs herunterladen: *OrCAD\_PSpice\_Designer\_Lite\_17.2-2016-S038.zip*.

In Kapitel 2 finden Sie eine Übersicht zu den Einschränkungen der Lite-Version. Der europäische Partner und Distributor von Cadence Design Systems ist die Firma FlowCAD. Studierende können im Rahmen des OrCAD-Studierendenprogramms gebührenfrei eine professionelle Vollversion des OrCAD PCB Designers mit dem PSpice-Simulator erhalten. Details hierzu finden Sie auf den Internetseiten der FlowCAD GmbH unter <https://www.flowcad.com>. Studierenden stehen nicht nur PSpice, sondern weitere Möglichkeiten wie der Entwurf von Leiterplatten (PCBs) und der Signal Explorer kostenfrei zur Verfügung.

Wie zuvor beschrieben haben Cadence Design Systems und Texas Instruments in Zusammenarbeit die Version PSpice for TI entwickelt. Im Vergleich zum kostenpflichtigen PSpice Designer Plus hat diese Version einen reduzierten Funktionsumfang. Werden Fremdmodelle von Bauteilen verwendet – also Bauteile nicht von TI –, dann können in Probe maximal drei Signale betrachtet werden. Auch Optionen der sogenannten PSpice Advanced Analysis stehen nicht zur Verfügung. Somit lassen sich die Beispiele aus Kapitel 12 (Elektrische Stressanalyse: Smoke Analysis) nicht simulieren. Aber die überwiegende Anzahl der Beispiele im Buch sollte bearbeitbar sein. PSpice for TI benötigt ein 64 bit Windows ab der Version 10.

## ■ 0.3 Zusatzinformationen auf plus.hanser-fachbuch.de

Neben dem Programmpaket OrCAD PSpice Designer Lite finden Sie auf *plus.hanser-fachbuch.de* weitere Informationen:

- zusätzliche Symbolbibliotheken im Archiv *add\_symbol\_libs.zip* unter dem Verzeichnis *add\_symbol\_libs*. Die Bauteil-Symbole der in Europa gebräuchlichen Norm IEC 60617 sind integriert.
- zusätzliche PSpice-Modell-Bibliotheken in *add\_model\_libs.zip* unter dem Verzeichnis *add\_model\_libs*.
- Bereits in der Lite-Version haben Sie Zugriff auf die volle Produktdokumentation. Die wichtigsten fünf Handbücher sind in *handbooks.zip* zusammengefasst:
  - PSpice User Guide,
  - PSpice AD Reference Guide,
  - PSpice Advanced Analysis User Guide,

- OrCAD Lite Reference,
- OrCAD Capture User Guide.
- Bauteil-Liste der Bibliotheken *eeval.olb*, *misc.olb* und *sample.lib* sowie weitere Zusatzmodelle.
- Als Anhang: Korrekturverzeichnis (Errata) mit Korrekturen und zusätzlichen Hinweisen zur 8. Auflage.

## ■ 0.4 Softwareinstallation OrCAD PSpice Designer Lite 17.2 und Zusatzbibliotheken

Folgende Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um OrCAD PSpice Designer in der Version Lite 17.2 und die Zusatzbibliotheken des Buches zu installieren.

### Hardwarevoraussetzungen:

- Prozessor mindestens Intel® Pentium® 4 oder AMD Athlon XP 2000,
- mindestens 8 GB Arbeitsspeicher und 2 GB freier Festplattenspeicher.

### Betriebssystem Microsoft in der Version:

- Windows® 7 Professional, Enterprise, Ultimate, Home Premium (64-bit) oder
- Windows® 8 (64-bit) oder
- Windows® 10 (64-bit),
- Windows® 11 (64-bit) wurde vom Autor erfolgreich getestet. Der Installationsfehler *ERROR(15053): Can not initialize PSpice UI* entstand dadurch, dass das Verzeichnis *cdssetup* nicht im Homeverzeichnis stand, also nicht unter *%HOME%/cdssetup*. Den Wert der Umgebungsvariable *HOME* finden Sie auf Ihrem Rechner in den erweiterten Systemeinstellungen der Windows-Systemsteuerung.

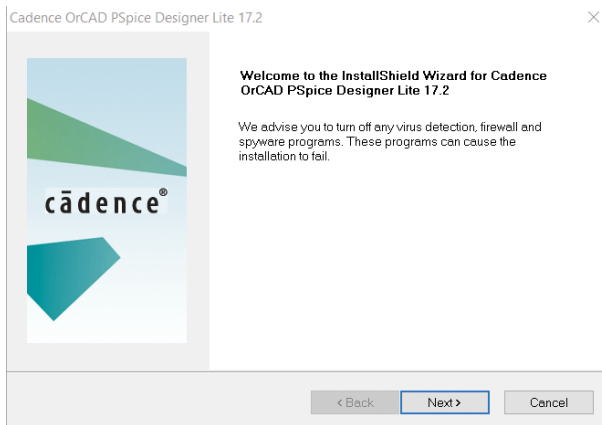
### Dateien von [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de):

- *OrCAD\_PSpice\_Designer\_Lite\_17.2-2016-S038.zip*,
- *add\_symbol\_libs.zip*,
- *add\_model\_libs.zip*.

Installieren Sie nun Schritt-für-Schritt den PSpice Designer Lite:

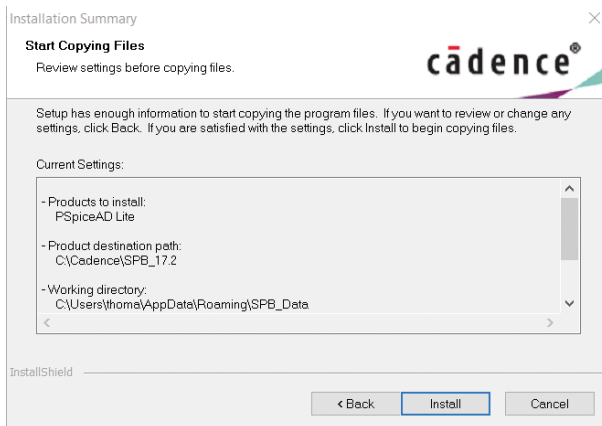


- I. Entpacken Sie *OrCAD\_PSpice\_Designer\_Lite\_17.2-2016-S038.zip* in ein frei gewähltes Installationsverzeichnis und starten Sie *setup.exe* mit der Option *Als Administrator ausführen*. Wenn Windows meldet *Wollen Sie zulassen, dass durch diese App Änderungen...* bestätigen Sie dies mit *Ja*. Der Installer startet (Bild 0.1) und mit *Next>* werden Sie zum License Agreement geführt, das Sie mit *I accept...* bestätigen.



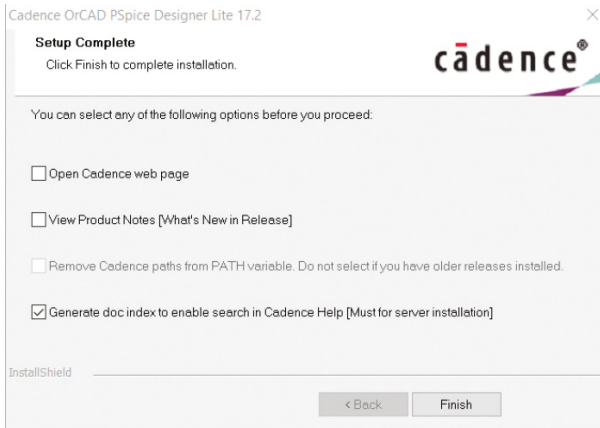
**Bild 0.1** Installationsstart

- II. Im folgenden Schritt können Sie festlegen, ob nur Sie oder alle Benutzer des Computers OrCAD benutzen sollen. Wählen Sie die von Ihnen gewünschte Option. Ein *Next>* führt Sie zu den Installation Settings. Da die nachfolgende Dokumentation auf das vorgeschlagene Verzeichnis *\Cadence\SPB\_17.2* Bezug nimmt, belassen Sie am besten den vorgeschlagenen Pfad. Nach einem weiteren *Next>* erscheint das Fenster *Start Copying Files* mit einer Zusammenfassung. Wählen Sie nun *Install* (Bild 0.2).



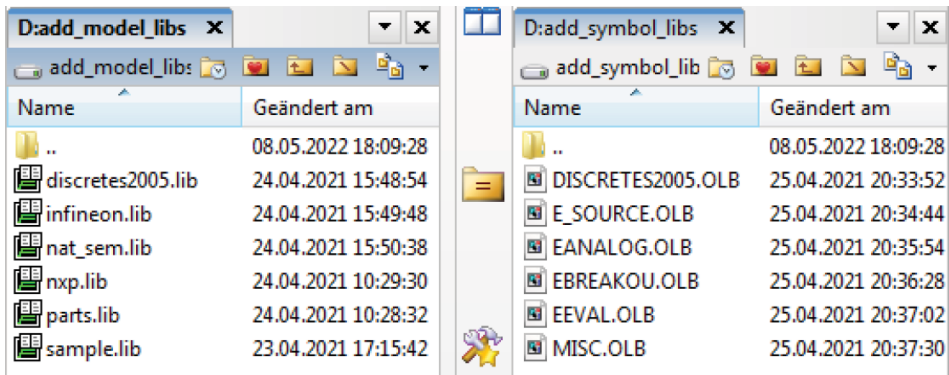
**Bild 0.2** Zusammenfassung der Installationseinstellungen

III. Die Installationsroutine kann je nach Computer ca. 10 min dauern und endet nach erfolgreicher Installation mit dem Setup Complete Fenster (Bild 0.3). Wenn Sie nun noch die Option Generate doc index... wählen, wird bereits vor dem ersten Start der internen OrCAD-Hilfe ein Index erzeugt. Schließen Sie die Installation mit Finish ab.



**Bild 0.3** Erfolgreicher Installationsprozess

IV. Entpacken Sie die beiden Verzeichnisse *add\_symbol\_libs* und *add\_model\_libs* aus dem Archiv *add\_libs.zip* in das zuvor frei gewählte Installationsverzeichnis. Bild 0.4 zeigt die Verzeichnisinhalte.

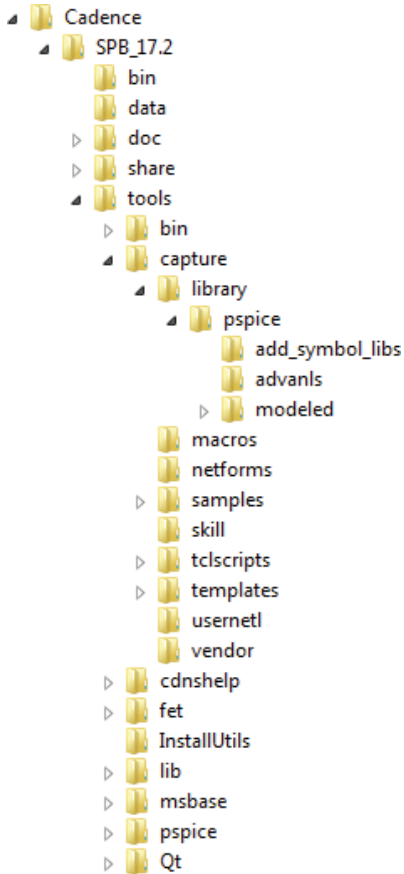


**Bild 0.4** Zusätzliche Symbolbibliotheken *add\_symbol\_libs* (rechts) und PSpice-Modell-Bibliotheken *add\_model\_libs* (links)

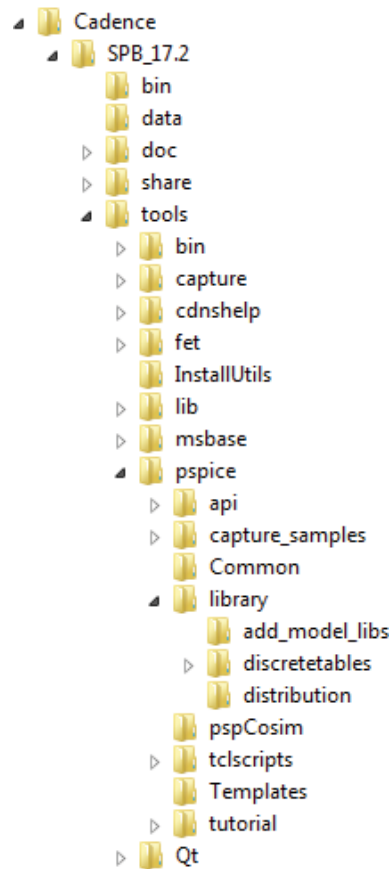
V. Kopieren Sie das Verzeichnis der Symbolbibliotheken *add\_symbol\_libs* nach *C:\Cadence\SPB\_17.2\tools\capture\library\pspice* (vgl. Bild 0.5)

und das Verzeichnis der Modell-Bibliotheken *add\_model\_libs* nach  
*C:\Cadence\SPB\_17.2\tools\pspice\library* (vgl. Bild 0.6.)

Verwenden Sie einen anderen Pfad, falls Sie im Schritt II ein abweichendes Verzeichnis gewählt haben.



**Bild 0.5** Pfad zu *add\_symbol\_libs*



**Bild 0.6** Pfad zu *add\_model\_libs*



Nun sind Sie bereit zur Bearbeitung des ersten Kapitels. Die oben gezeigte Installation wurde unter Windows 10 durchgeführt. Die Programmgruppe sieht unter Windows 7 wie in Bild 1.1 im ersten Hauptkapitel aus. Diese unterscheidet sich also etwas vom obigen Bild 0.7.

## ■ 0.5 Zahlenformate, Einheiten und Typografie

PSpice ist wie SPICE ein amerikanisches Programm und nutzt daher die in Amerika übliche Zahlendarstellung.

- PSpice verwendet den im englischsprachigen Raum üblichen Punkt als Dezimaltrennzeichen. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird im Buchtext ebenfalls der Punkt statt dem Komma verwendet, z. B.  $I = 3.45 \text{ A}$ .
- Die Angabe von Einheiten wie z. B. A für Ampere oder V für Volt wertet PSpice nicht aus. Die Einheit wird als Kommentar interpretiert, allerdings darf zwischen Zahlenwert und Einheit nicht – wie formal korrekt – ein Leerzeichen stehen. Dies würde PSpice mit einer Fehlermeldung quittieren. Im Text wird überwiegend ein Leerzeichen zwischen Zahlenwert und Einheit eingefügt. Es sei denn, dass dies zum beschriebenen Problem führt. Beispiel: *Geben Sie für die Stromquelle I1 bei DC den Wert 3A ein* und nicht...*bei DC den Wert 3 A ein*.
- Zehnerpotenzen werden wahlweise ausgeschrieben oder mit E abgekürzt: z. B.  $5.23 \cdot 10^{-12}$  oder 5.23E-12.
- Statt des Zahlenvorsatzes „u“ für Mikro wird – wie auch in PSpice – im Buchtext häufig das „µ“ verwendet.
- Auf eine Übersetzung gebräuchlicher, englischer Begriffe wird häufig verzichtet und es werden vorzugsweise PSpice-Begriffe verwendet: Analysis statt Analyse, Profile statt Profil etc.
- Projekte, Variablen, Bauteilsymbole, Attribute, PSpice-Menüs, -Fenster, -Optionen, -Befehle, -Schaltflächen: Schmalschrift, z. B. Copy.
- Befehlsfolgen: Trennung durch Schrägstrich oder Pfeil, z. B. Edit/Copy oder File → Save As
- Textzitate, Dateien, Ordner: Kursiv-Schrift, z. B. *misdiode.opj*.
- Tastenbezeichnungen: spitze Klammern, z. B. <Alt>
- Heißt es im Text „Anklicken mit der Maus“ ist – wenn nicht anders angegeben – die linke Maustaste gemeint. Mit einem Rechtsklick öffnet sich in PSpice, wie in Windows üblich, erst mal nur ein Kontextmenü. Die Auswahl sowie die Durchführung einer Aktion erfolgt in der Regel per linker Maustaste.

# 1

## Zeichnen von Schaltplänen

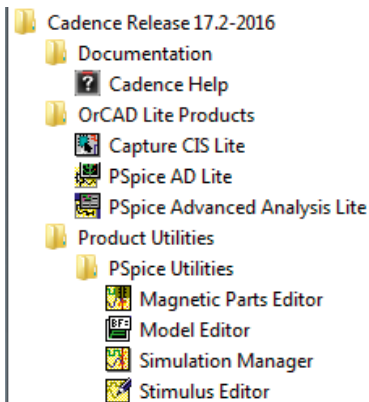
### ■ 1.1 Capture starten

Zum Zeichnen von Schaltplänen starten Sie Capture aus dem Windows-Startmenü.



#### Aktion 1.1

Aktivieren Sie Capture aus dem Windows-Startmenü heraus durch Anklicken des Namens Capture CIS Lite mit der Maus (Bild 1.1). CIS steht für Component Information System und ermöglicht die Anbindung an eine Komponenten-Datenbank. Diese Möglichkeit wird hier aber nicht genutzt.



**Bild 1.1** Windows-Startmenü mit markiertem Suchweg zu Capture

Nach der Erstinstallation erhalten Sie die Meldung *PSpice A/D license was not found. [...] Would you like to launch Simulation Manger Lite?* Die Frage bestätigen Sie mit Yes und aktivieren das Feld *Don't ask me again before launching lite version of the tools.*

Es öffnet sich der Startbildschirm von Capture (Bild 1.2).