

6	Umwelteinflüsse	269
6.1	Übersicht	269
6.2	Art und Wirkung der Umwelteinflüsse	269
6.2.1	Tieftemperaturen	271
6.2.2	Wärme und Licht	271
6.2.3	Feuchte	272
6.2.4	Wasser	274
6.2.5	Kondensation	274
6.2.6	Korrosion	275
6.2.7	Mechanische Beanspruchungen	277

6.2.8	Sonstige Umwelteinflüsse	279
6.3	Schutz gegen Umwelteinflüsse	280
6.3.1	Tauchverfahren	280
6.3.2	Gießen	281
6.3.3	Sinterverfahren	281
6.3.4	Härtung	281
6.3.5	Silikone	282
6.3.6	Epoxidharze	283
6.3.7	Ungesättigte Polyesterharze	283
6.3.8	Polyurethanharze	283
6.4	Pflichtenhefte für Umweltbedingungen	284
6.5	Simulation der Umwelteinflüsse	286

6 Umwelteinflüsse

6.1 Übersicht

Die in Industrie, Verkehr und Wirtschaft eingesetzten elektronischen Geräte gehören zu den langlebigen Investitionsgütern, an die besondere Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit gestellt werden. Beispielsweise entstehen beim Ausfall eines Gerätes der Industrieelektronik oft hohe Folgekosten durch Produktionsausbruch oder Produktionsausfall. Fehler in Verkehrssicherungs- oder -leitsystemen können katastrophale Auswirkungen hervorrufen.

Die Geräte sind unter Einsatzbedingungen einer Vielzahl von Umwelteinflüssen ausgesetzt. Dabei kann die Funktion der Bauelemente durch Veränderung ihrer Parameter, die für den Anwendungszweck funktionswichtig sind, beeinflusst werden. Die auftretende Veränderung kann reversibel sein und nach Beseitigung der Einflußgröße verschwinden. Es kann aber auch eine bleibende Veränderung auftreten, die die Funktionsfähigkeit begrenzt und unter Umständen die zu erwartende Lebensdauer verkürzt.

Es ist also wichtig, vor dem Beginn einer Entwicklung die Umweltbedingungen zu ermitteln, unter denen das Gerät später zuverlässig arbeiten soll. Die vom Anwender erwarteten Qualitätsmerkmale sind nur durch ausreichende Dimensionierung, günstige Konstruktion, geeignetes Material, zweckmäßige Fertigung sowie sorgfältige Einstellungen und Prüfungen sicherzustellen.

Die Prüfungen sind zu unterscheiden in solche, die zeigen, ob das Entwicklungs- oder Fertigungsergebnis überhaupt funktioniert, und solche, die nachweisen, ob es bei den zu erwartenden Umweltbedingungen funktionsfähig ist und die geplante Lebensdauer erreicht.

Es ist ein wirtschaftliches Optimierungsproblem, für welche Umgebungsbedingungen man die «Normalausführung» eines Gerätes festlegt. Normal- und umgebungsbedingte Spezialausführungen unterscheiden sich nur graduell. Die Abgrenzung ist eine Frage der Verkaufspolitik.

6.2 Art und Wirkung der Umwelteinflüsse

Die Umwelteinflüsse lassen sich grob in klimatische, mechanische und sonstige Einflüsse einteilen. Im folgenden soll, neben der kurzen Angabe von möglichen Wirkungen wichtiger Einflüsse, auf Gegenmaßnahmen hingewiesen werden.

Tabelle 6.1 Klimawerte für Europa, gemäßigte Zone

Montageort	Temperaturen in °C Funktion gewährleistet bei		keine Schädigung, nicht angeschlossen		Feuchtigkeit Maximale rel. Feuchte		Jahres- mittel der r.F. %	Kennbuch- stabe für Feuchte DIN 40040	Bemerkung
	tief °C	hoch °C	tief °C	hoch °C	%	Tage			
Trockene Innenräume	-10	38	-25	60	85	60	≤ 65	G	Keine Betauung
					75	Rest			
Feuchtigkeitsge- fährdete Räume	-10	38	-25	60	95	30	≤ 75	F	z.B. Küchen und Badezim- mer in Wohnungen, keine Betauung
					85	Rest			
Feuchte Räume	-10	35	-25	60	100	30	≤ 80	D	z.B. feuchte Keller, Betau- ung
					90	Rest			
Außenräume	-25	40	-25	60	100	30	≤ 80	D	Gerät vor Regen und star- ker Sonnenstrahlung ge- schützt, sonst Außenatmo- sphäre. Betauung
					90	Rest			
Freiluft	-25	40 ohne Sonne	-25	60	100	30	≤ 80	D	Gerät dicht gegen Tropf- und Spritzwasser, Betauung
		55 mit Sonne			90	Rest			

Die klimatischen Bedingungen der einzelnen Gebiete der Erde können einer Klimakarte der DIN 50019 [6.1] entnommen werden. Für klimatische und mechanische Prüfungen sei auf [6.2] und [6.3] verwiesen.

Tabelle 6.1 enthält Klimarichtwerte für Geräte, die in den gemäßigten Zonen Europas eingesetzt werden. Bei den angegebenen Temperaturen handelt es sich um zweckmäßige Werte für Pflichtenhefte. Gegebenenfalls liegen seitens der Anwender andere Erfahrungswerte vor.

6.2.1 Tieftemperaturen

Beispiele reversibler Wirkungen bei tiefen Temperaturen:

- Verringerung der Stromverstärkung von Transistoren.
- Änderung der Leitfähigkeit, der Permeabilität und von Temperaturkoeffizienten.
- Änderung des Elastizitätsmoduls von Werkstoffen.
- Starke Viskositätszunahme der Schmierstoffe.
- Elastische Verformung durch unterschiedliche Ausdehnung verschiedener Werkstoffe.

Beispiel für irreversible Wirkungen bei tiefen Temperaturen:

- Verformung oder Bruch durch unterschiedliche Ausdehnung oder Versprödung.

Gegenmaßnahmen:

Durch eine Kälteschutzheizung kann verhindert werden, daß die Temperatur der Bauelemente unter ihre untere Funktionstemperatur sinkt. Um eine Verringerung der Lebensdauer zu verhindern, ist diese Heizung bei höheren Temperaturen, zum Beispiel durch einen Thermostaten, auszuschalten.

6.2.2 Wärme und Licht

Beispiele reversibler Wirkungen bei hohen Temperaturen:

- Erhöhung der Restströme von Transistoren.
- Änderung von Temperaturkoeffizienten.
- Elastische Verformung durch unterschiedliche Ausdehnung von Werkstoffen.
- Viskositätsabnahme der Schmierstoffe.

Beispiele irreversibler Wirkungen bei Wärme- und Lichteinwirkung:

- Schnellere Alterung von elektronischen Bauelementen, magnetischen Werkstoffen, Kunststoffen, Schmierstoffen.
- Schnellere Verdunstung von Weichmachern, Schmierstoffen usw.
- Bleibende Verformung durch unterschiedliche Ausdehnung von Werkstoffen.
- Bleichen von Farben.

Gegenmaßnahmen:

- Die Verlustleistung der Geräte bzw. ihre Eigenerwärmung gering halten.
- Beim Betrieb in geschlossenen Räumen Klimaanlage oder Zwangsbelüftung der Geräte.
- Bei Freiluftmontage und starker Sonneneinstrahlung helle Gerätegehäuse verwenden. Hierdurch ist eine Verringerung der Gehäuseinnentemperatur, verglichen mit dunklen Gehäusen, bis zu 10 °C möglich. Durch Verschmutzung läßt die Wirkung der hellen Farbe allerdings nach.
- Lichtundurchlässige Gehäuse verwenden (siehe auch 4.2.5).
- Lichtechte Lacke und Druckfarben verwenden.

Allgemeine Hinweise:

Vielen Alterungsprozessen liegen chemische Reaktionen (Oxidation, Zersetzung usw.) zugrunde. Oxidationsprozesse lassen sich näherungsweise durch das Arrheniussche Gesetz [2.1] beschreiben. Auf elektronische Bauelemente angewandt läßt sich, stark vereinfacht, feststellen, daß eine Temperaturerhöhung um 10 K etwa eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit bedeutet. Beim Vorhandensein chemischer Reaktionen halbiert sich also die Lebensdauer von Bauelementen oder Materialien, wenn die Temperatur um 10 K steigt.

6.2.3 Feuchte

Beispiele reversibler Wirkungen bei Feuchteeinwirkung:

- Verringerung von Isolationswiderständen und der Spannungsfestigkeit, Erhöhung des Verlustwinkels, Änderung der Dielektrizitätszahl von Isolierstoffen.
- Quellen organischer Stoffe.

Beispiele irreversibler Wirkungen bei Feuchteeinwirkung:

- Korrosion von Metallen.
- Gleichstromkorrosion.
- Begünstigung der Ausdünstung von Kunststoffen.
- Schimmelwachstum.

Gegenmaßnahmen:

- Bauelemente, Moduln, Leiterplatten mit Schutzlacken oder Gießharzen überziehen (siehe 6.3).
- Kriechstrecken vergrößern.
- Metallische Oberflächen lackieren oder galvanisch behandeln (z.B. vernikeln).
- Feuchtigkeitschutzheizung.
- Hermetische Abdichtung.

Allgemeine Hinweise:

Bauelemente und Geräte sind selten absolut hermetisch gegen die Umgebung abgeschlossen. Dadurch dringt die Luftfeuchtigkeit durch *Atmung* infolge Temperaturschwankungen sowie durch *Diffusion* allmählich in das Gerät ein.

Bei einer Übertemperatur des Gerätes gegenüber, der Umgebung treten zwar Atmung und Diffusion trotzdem auf. Die eingedrungene feuchte Luft wird jedoch im Innern des Gerätes erwärmt, und ihre relative Feuchte (r.F.) sinkt dadurch sehr schnell ab. Tabelle 6.2 zeigt, daß eine Übertemperatur von 4 bis 6 K in den üblichen Klimaten ausreicht.

Genügt die Eigenerwärmung des Gerätes nicht, so kann durch eine dauernd eingeschaltete Feuchtigkeitsschutzheizung die erforderliche Übertemperatur erreicht werden. Die in Tabelle 6.2 angegebenen Heizleistungen sind nur grobe Richtwerte. Der genaue Wert ist für jedes Gerät durch Versuche zu ermitteln.

Es ist zu beachten, daß die dauernd eingeschaltete Feuchtigkeitsschutzheizung das Gerät auch bei höchster Außentemperatur oder stärkster Sonneneinstrahlung erwärmt. Bei Lagerung oder im ausgeschalteten Zustand ist selbstverständlich kein Feuchtigkeitsschutz vorhanden.

Während des Transports oder der Lagerung ist es üblich, die Geräte feuchtigkeitssicher in Plastikbahnen zu verpacken. Bei Erwärmung kann dabei im Innern der Verpackung Feuchtigkeit frei werden, die vorher von hygroskopischen Materialien aufgenommen wurde. Diese Feuchtigkeit kann zum Beispiel Korrosion auf ungeschützten Metallteilen hervorrufen. Zur Absorption kann feinporöse Kieselsäure (z.B. «Silicagel») verwendet werden, die bis zu 20% ihres Eigengewichtes Wasser aufnehmen kann. Eine Trocknung dieses Materials ist bei 150 bis 200 °C möglich.

Feuchtigkeit führt, zusammen mit höheren Temperaturen, oft zu schweren Schäden an Geräten. Ihr ist daher besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Tabelle 6.2 Relative Feuchte im Gerät als Funktion der Übertemperatur

Zustand der Umgebung	Relative Feuchte im Gehäuse bei einer Temperaturerhöhung von				
	1 °C	2 °C	4 °C	6 °C	8 °C
100% r.F./30 °C	95%	90%	81%	73%	66%
90% r.F./30 °C	85%	81%	73%	66%	59%
Ungefähre Heizleistung je 100 cm ² Gehäuseoberfläche	0,1 W	0,2 W	0,4 W	0,6 W	0,8 W

6.2.4 Wasser

Das Eindringen von Wasser in Gerätegehäuse ist besonders kritisch bei Freiluftmontage. Neben der Beanspruchung durch Tropf-, Sprüh-, Spritz- oder Strahlwasser [6.4] ist das *Eindringen von Wasser durch Unterdruck* zu beachten. Dieses soll an einem Beispiel erläutert werden.

Ein im Freien stehendes Gerät sei durch Sonneneinstrahlung erwärmt worden. Durch einen plötzlichen Gewitterregen sinkt die Temperatur im Innern schnell ab, wodurch ein beträchtlicher Unterdruck entsteht. Dieser wird sich ausgleichen durch die undichten Stellen des Gehäuses. Die dabei ausgetauschte Luftmenge kann bis zu 10% des Luftvolumens im Gerät betragen.

Die Undichtigkeiten können beispielsweise in der Stoffuge einer Gummidichtung oder in den Öffnungen der Bedienungsorgane bestehen. Befindet sich an diesen Stellen ein durch den Regen erzeugter Wasserfilm, so wird Wasser in das Gerätegehäuse gesogen. Das Wasser sammelt sich am Boden des Gerätes, wenn dieses dort dicht ist. Dieses Wasser wird gelegentlich fälschlicherweise als Kondenswasser bezeichnet.

Die einfachste und wirksamste Gegenmaßnahme ist die Anbringung einer Ausgleichsöffnung an einer geschützten Stelle des Gehäuses, z.B. an der Unterseite. Besitzt diese Öffnung einen großen Querschnitt und damit einen geringen Strömungswiderstand, so tritt an anderen Stellen des Gehäuses keine merkliche Saugwirkung mehr auf.

6.2.5 Kondensation

Atmosphärische Luft enthält immer Wasserdampf. Die Höchstmenge Wasserdampf, die in einer bestimmten Luftmenge enthalten sein kann, ist von der Temperatur abhängig; sie steigt mit der Temperatur. Kühlt man Luft mit einem bestimmten Gehalt an Wasserdampf ab, so steigt die relative Luftfeuchtigkeit so lange an, bis die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist (100% r.F.). Bei weiterer Abkühlung kondensiert der Wasserdampf an festen Oberflächen zu Wasser, es bildet sich Tau.

Bei Geräten tritt Kondensation ein, wenn eine Oberfläche kühler ist als der Taupunkt der umgebenden Luft. Dieses kann geschehen, wenn Geräteteile thermisch mit dauernd unterkühlten Bauteilen gekoppelt sind (Wasserleitungen, bis in kühlere Bodenschichten reichende metallische Träger usw.) und wenn das unterkühlte Teil von Umgebungsluft bestrichen wird.

Als Gegenmaßnahmen sind sachgerechte Montage und Feuchtigkeitsschutzheizung möglich.

6.2.6 Korrosion

Korrosion ist nach DIN 50900 die «Zerstörung von Metall durch chemische oder elektrochemische Reaktion mit seiner Umgebung».

Der bekannteste Fall der chemischen Korrosion ist das Rosten des Eisens durch Einwirkung der Atmosphäre, also von Sauerstoff, Kohlendioxid und Feuchtigkeit. Neben dem Eisen korrodieren auch viele andere Metalle bereits bei Einwirkung der Atmosphäre. Auch industrielle Abgase, Salzatmosphäre, Chemikalien, Lebensmittel u.a. rufen Korrosion hervor.

Elektrochemische Korrosion tritt beispielsweise auf, wenn sich verschiedene Metalle berühren und gleichzeitig Luft und Feuchtigkeit oder wäßrige Lösungen von Basen, Säuren oder Salzen einwirken. Dabei entstehen galvanische Elemente. So pflegt eine zerkratzte Konservendose aus Weißblech (verzinntes Stahlblech) schneller zu rosten als gewöhnliches Stahlblech.

Korrosionsschutz erreicht man durch Farb- und Lackanstriche, wobei die Farbe gleichzeitig ästhetische Anforderungen erfüllen kann. Das Beschichten mit Schutzlacken oder Gießharzen läßt sich auch für elektronische Schaltungen und Leiterplatten anwenden (siehe 6.3).

Ebenso kann Korrosionsschutz durch edle, selbst nicht korrodierende Metalle erzeugt werden oder durch unedle, die sich selbst mit einer Schutzschicht überziehen. Die wichtigsten Verfahren für die Aufbringung sind Tauchen in metallische Schmelzen, Aufspritzen, Eindiffundieren, Plattieren und galvanisches Überziehen.

Die elektrochemische Korrosion läßt sich oft nur durch die Auswahl geeigneter Metallkombinationen verhindern oder wenigstens vermindern. Kritisch sind hier alle Übergangsstellen zwischen zwei Metallen (Chassisblech, Befestigungsschraube, Unterlegscheibe, Federelement usw.). Zu beachten ist, daß Rost, Korrosionsstaub usw. an anderen Stellen Sekundärkorrosionen auslösen können.

Zur Verhinderung der elektrochemischen Korrosion sollten alle kombinierten Metallteile hinsichtlich ihres Abstandes in der *elektrochemischen Spannungsreihe* untersucht werden. Je geringer der Abstand ist, um so weniger korrodiert. Aus Tabelle 6.3 kann die Potentialdifferenz direkt abgelesen werden.

Für normal beanspruchte Geräte kann eine zulässige Potentialdifferenz von 0,5 V als Richtwert gelten. Bei höherer klimatischer Beanspruchung sollten 0,25 V nicht überschritten werden [2.1].

Lassen sich Kombinationen von Metallen mit größerer Potentialdifferenz nicht vermeiden, so kann diese durch galvanische Beschichtung mit entsprechenden Metallen wieder reduziert werden. Nachträgliche Bearbeitungen (Bohren, Abkanten usw.) zerstören diesen Schutz an den betreffenden Stellen wieder.

Eine Umkehrung der galvanischen Elemente tritt bei der *Gleichstromkorrosion* auf. Beim Vorhandensein einer Spannung von über ca. 1 V von Leiter zu Leiter oder zwischen Masse und Leiter und der Anwesenheit eines Elektrolyten tritt eine Materialwanderung entsprechend den Faradayschen Gesetzen der Elektrolyse auf.

Tabelle 6.3 Elektrochemische Spannungsreihe der Metalle (AEG-Telefunken [6.5])

Katode	Anode																																
Zink	0,76	Zink																															
Thorium	0,96	0,20	Thorium																														
Aluminium	1,05	0,29	0,08	Aluminium																													
Cadmium	1,05	0,29	0,08	0,01	Cadmium																												
Woodmetall	1,07	0,31	0,09	0,01	0	Woodmetall																											
Cadmiumlot	1,11	0,35	0,11	0,03	0,03	0,02	Cadmiumlot																										
Indium	1,14	0,38	0,18	0,10	0,10	0,09	0,07	Indium																									
Dynamoblech	1,21	0,45	0,28	0,19	0,20	0,19	0,17	0,10	Dynamoblech																								
Blei	1,26	0,50	0,29	0,22	0,21	0,20	0,18	0,11	0,01	Blei																							
Weichlot	1,32	0,56	0,34	0,27	0,28	0,27	0,25	0,16	0,08	0,05	Weichlot																						
Weißmetall	1,33	0,57	0,34	0,27	0,28	0,27	0,25	0,16	0,08	0,05	0	Weißmetall																					
Zinn	1,36	0,60	0,39	0,31	0,31	0,30	0,28	0,21	0,11	0,10	0,05	0,05	Zinn																				
Eisen, Stahl	1,36	0,60	0,40	0,32	0,32	0,31	0,29	0,22	0,12	0,11	0,07	0,06	0,01	Eisen, Stahl																			
Kobalt	1,39	0,63	0,42	0,34	0,34	0,33	0,31	0,25	0,14	0,13	0,08	0,08	0,03	0,02	Kobalt																		
Chrom	1,39	0,63	0,42	0,34	0,34	0,33	0,31	0,25	0,14	0,13	0,08	0,08	0,03	0,02	0	Chrom																	
Tantal	1,53	0,77	0,57	0,49	0,49	0,48	0,46	0,41	0,29	0,28	0,23	0,23	0,20	0,20	0,15	0,05	Tantal																
Messing	1,54	0,78	0,61	0,50	0,50	0,49	0,47	0,43	0,30	0,32	0,27	0,27	0,22	0,20	0,19	0,09	0,04	Messing															
Leitbronze	1,56	0,80	0,61	0,53	0,54	0,52	0,50	0,44	0,33	0,32	0,27	0,27	0,22	0,21	0,19	0,09	0,05	0,01	Leitbronze														
Neusilber	1,58	0,82	0,62	0,54	0,54	0,53	0,51	0,44	0,34	0,33	0,28	0,28	0,23	0,22	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	Neusilber													
Kupfer	1,58	0,82	0,63	0,55	0,55	0,54	0,52	0,45	0,35	0,34	0,29	0,29	0,24	0,23	0,21	0,11	0,06	0,02	0,02	0	Kupfer												
Bronze	1,58	0,82	0,63	0,55	0,55	0,54	0,52	0,45	0,35	0,34	0,29	0,29	0,24	0,23	0,21	0,11	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	Bronze											
Nickel	1,58	0,82	0,64	0,56	0,56	0,55	0,53	0,46	0,36	0,35	0,30	0,30	0,25	0,25	0,22	0,12	0,07	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	Nickel										
Konstantan	1,60	0,84	0,65	0,56	0,57	0,56	0,54	0,47	0,37	0,36	0,31	0,31	0,26	0,25	0,23	0,13	0,08	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	Konstantan									
Wolfram	1,61	0,85	0,65	0,57	0,57	0,56	0,54	0,47	0,37	0,36	0,31	0,31	0,26	0,25	0,23	0,13	0,08	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0	Wolfram								
Rostbest. Stahl, Rhodium	1,67	0,91	0,72	0,64	0,64	0,63	0,61	0,54	0,44	0,43	0,38	0,38	0,33	0,32	0,30	0,20	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	Rostbest. Stahl, Rhodium							
Titan	1,74	0,98	0,77	0,68	0,69	0,68	0,66	0,59	0,49	0,48	0,43	0,43	0,38	0,37	0,35	0,25	0,20	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,05	Titan						
Molybdän, Silber-Palladium	1,76	1,00	0,79	0,70	0,71	0,70	0,68	0,61	0,51	0,50	0,45	0,45	0,40	0,39	0,37	0,27	0,22	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,07	0,02	Molybdän, Silber-Palladium					
Silber	1,78	1,02	0,83	0,75	0,75	0,74	0,72	0,65	0,55	0,54	0,49	0,49	0,44	0,43	0,41	0,31	0,26	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,19	0,18	0,18	0,11	0,06	0,04	Silber				
Rostbest. Stahl (Anoxin)	1,82	1,06	0,86	0,78	0,78	0,77	0,75	0,68	0,58	0,57	0,52	0,52	0,47	0,46	0,44	0,34	0,29	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21	0,14	0,09	0,07	0,03	Rostbest. Stahl (Anoxin)			
Gold	1,91	1,15	0,94	0,85	0,86	0,85	0,83	0,76	0,66	0,65	0,60	0,60	0,55	0,54	0,52	0,42	0,37	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,22	0,17	0,15	0,11	0,08	Gold		
Kohlenstoff, Graphit	1,94	1,18	0,99	0,89	0,89	0,88	0,86	0,81	0,69	0,68	0,65	0,65	0,60	0,57	0,55	0,45	0,42	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,34	0,33	0,34	0,27	0,22	0,20	0,16	0,13	0,05	Kohlenstoff, Graphit	
Platin	1,96	1,20	1,02	0,92	0,92	0,91	0,89	0,84	0,72	0,71	0,66	0,66	0,63	0,60	0,58	0,48	0,45	0,39	0,41	0,40	0,40	0,39	0,37	0,36	0,37	0,30	0,25	0,23	0,19	0,16	0,08	0,03	Platin

Elektrolyt : 3%ige Kochsalzlösung
 Meßgenauigkeit : ± 0,02 V
 Spannungen in V

Der Elektrolyt kann dabei durch Feuchtigkeit im Isoliermaterial gebildet werden. Die transportierte Materialmenge pro μA und Jahr beträgt dabei etwa 6 mg bei Eisen, 10 mg bei Kupfer, Nickel und Zinn, 30 mg bei Silber und 60 mg bei Gold.

6.2.7 Mechanische Beanspruchungen

Mechanische Beanspruchungen sollten in ihren Auswirkungen nicht unterschätzt werden, da sie oft in kurzer Zeit zum Ausfall von Verbindungen und Leitungen führen können. Die äußeren, durch Natur und Technik verursachten Beanspruchungen, lassen sich im wesentlichen einteilen in

- *Schwingungen* (regelmäßige, periodische Sinuswellen).
- *Stöße* (einmalige oder regelmäßig wiederkehrende dynamische Abläufe, i.a. in einer Richtung).
- *Erschütterungen* (unregelmäßige, oft zackenartige Bewegungen mit hoher Frequenz).
- *Konstante Beschleunigung* (in einer Richtung für längere Dauer).

Die Schwingungsbilder der ersten drei Beanspruchungsarten sind in Bild 6.1 dargestellt.

Zur Beurteilung der Auswirkungen auf Geräte und ihre Bauelemente soll kurz auf das Wesen der Schwingungen eingegangen werden.

Verformt man einen Körper (Federstab, Leiterplatte, Bauelement mit Anschluß, Gestell usw.) elastisch durch eine kurzzeitig einwirkende Kraft, so wird er nach Beendigung dieser Einwirkung durch eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Rückstellkraft in *Biegeschwingungen* versetzt. Diese Schwingungsfrequenz f_e ist dabei um so größer, je größer die Federsteife c (Gleichung (3.2.3)) und je kleiner die Masse m des Körpers ist.

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (6.1)$$

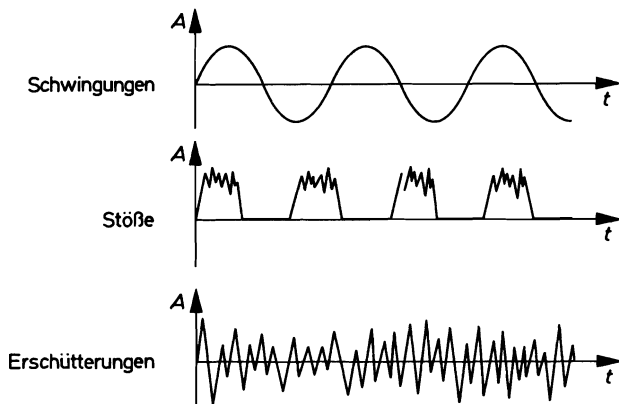


Bild 6.1 Schwingungsbilder äußerer Beanspruchungen

f_e : Frequenz in Hz
 c : Federsteife in $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
 m : Masse in kg

Die Schwingungsfrequenz ist unabhängig von der Größe der erregenden Kraft, diese bestimmt nur die Amplitude A der Schwingung. Alle Körper haben somit eine bestimmte Eigenfrequenz f_e . Werden die Schwingungen nur einmal angeregt, so tritt durch Luftwiderstand, Reibung und dergleichen allmählich Stillstand ein. Wird jedoch ein Körper durch äußere Beeinflussung immer wieder im Rhythmus der Eigenschwingung angeregt, dann kommt es zur Resonanz (Bild 6.2). Die Schwingungsausschläge werden nach jedem Anstoß größer, so daß unter Umständen sogar ein Bruch eintreten kann.

Geräte bestehen aus einer Vielzahl von schwingungsfähigen Gebilden, die üblicherweise alle verschiedene Eigenfrequenzen besitzen. Die Ermittlung dieser Frequenzen kann, wegen des komplexen Aufbaus, nur experimentell mit Hilfe geeigneter Vibrations- und Meßeinrichtungen erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine oder mehrere Komponenten eines Gerätes in Resonanz mit einer von außen einwirkenden Frequenz geraten, ist relativ groß. Daher sollten bei der Erwartung von äußeren mechanischen Beanspruchungen grundsätzlich die folgenden *Vorsichtsmaßnahmen* getroffen werden.

Große Flächen bei Leiterplatten, Chassis und Gehäusen neigen leicht zum Schwingen. Gleiches gilt für große Massen (Transformatoren usw.), die auf Blechen montiert sind. Lassen sich große Flächen nicht vermeiden, so kann durch Rippen oder Sicken für größere Steifigkeit gesorgt werden.

Bauelemente, die nur durch ihre Anschlüsse gehalten werden, schwingen ebenfalls leicht. Die Länge der Anschlußdrähte sollte so kurz gehalten werden, wie es die Einbau- und Lötvorschriften der Hersteller zulassen (Zug-, Biege- und Temperaturbeanspruchung). Kleine Bauelemente lassen sich zusätzlich auf der Leiterplatte festkleben (ggf. schlechtere Wärmeableitung beachten), größere zusätzlich durch Schellen o.ä. befestigen (siehe 3.4.3.3).

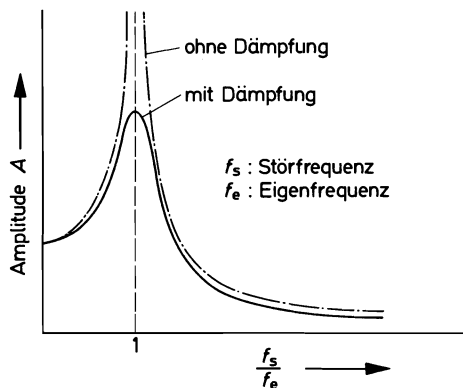
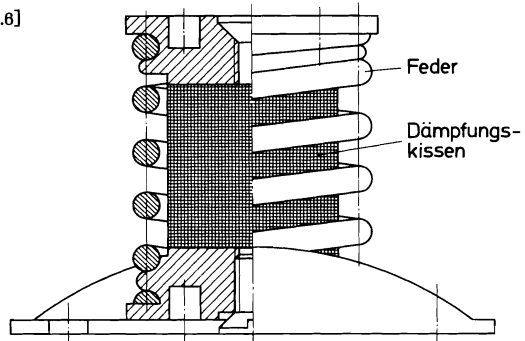


Bild 6.2 Resonanzkurve mit und ohne Dämpfung

Bild 6.3 Stoß- und Schwingungsdämpfer [6.6]



Längere Leitungen und *Kabelbäume* sind gut abzufangen, um ein Schwingen zu vermeiden. Neben der Beanspruchung auf Biegewechselfestigkeit ist die Durchscheuergefahr bei der Isolation zu beachten.

Grundsätzlich sollte der *Montageort* für elektronische Geräte so gewählt werden, daß die Schwingungs- und Stoßbeanspruchung möglichst gering ist, also nicht in der Nähe von rotierenden oder schwingenden Einrichtungen. Läßt sich ein solcher Montageplatz nicht vermeiden, können *Stoß- und Schwingungsdämpfer* verwendet werden. Diese bestehen aus Silikonkautschuk oder einer Kombination von Feder und Dämpfungskissen (Bild 6.3). Sie besitzen eine bestimmte Resonanzfrequenz und eine hohe Dämpfungsfähigkeit gegen Schwingungen. Diese Dämpfungselemente werden zwischen Gerät und Aufstellfläche montiert.

Bei Schwingungsanregung durch schnelllaufende Maschinen sollte das Verhältnis zwischen Störfrequenz und Eigenfrequenz f_0 des Dämpfers möglichst groß gewählt werden (Bild 6.2). Zur Dämpfung von Stößen muß die Eigenfrequenz der Dämpfer möglichst hoch über der Wiederholfrequenz der Stöße liegen. Zur Isolierung gegen Erschütterungen ist ein Material mit hoher Eigendämpfung zu wählen. Die Anregung durch sehr niedrige Frequenzen ist dabei besonders schwer zu beherrschen.

6.2.8 Sonstige Umwelteinflüsse

In den vorigen Abschnitten wurden die besonders häufig auftretenden Umwelteinflüsse angesprochen. Im folgenden erfolgt eine Aufzählung weiterer Einflüsse, die ggf. zu berücksichtigen sind.

Meeresklima

Durch Brandung und Wind wird Salzwasserstaub landeinwärts getragen und auf den im Freien montierten Geräten abgelagert. Man sollte in der Regel eine Einwirkungszone von 1 km Tiefe berücksichtigen. Durch die ständige Ablagerung des Salzes auf der Geräteoberfläche entsteht eine sehr hohe Korrosionsbeanspruchung. Stahlgehäuse sollten eine PVC-Lackierung erhalten oder feuerverzinkt werden

($\geq 100 \mu\text{m}$). Das Innere der Geräte ist durch Baumwoll- oder Gummidichtungen ausreichend geschützt, besonders wenn das Gerät ständig eine Übertemperatur besitzt.

Sand und Staub

Sand und Staub können im Innern von Geräten zu Störungen bei mechanischen Funktionsgruppen (z.B. Schaltern, Relais) führen. Zur Abdichtung lassen sich unter Druck stehende Baumwollschnüre oder Dichtungsschläuche verwenden, die keine offene Stoffuge besitzen. Betätigungsmechanismen sind wirksam abzudichten.

Beim Öffnen von staubgefährdeten Geräten ist darauf zu achten, daß der auf dem Gehäuse abgelagerte Staub nicht in das Gerät fällt.

6.3 Schutz gegen Umwelteinflüsse

Wenn Leiterplatten, Moduln und Baugruppen dem Einfluß von Staub, Feuchtigkeit, Abgasen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, ist ein besonderer Schutz erforderlich. Dieser Schutz läßt sich durch *Umhüllen* oder *Einbetten* in geeignete Kunststoffe erreichen. Derartige Verbindungen sind in großer Zahl und mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften auf dem Markt, so daß hier nur kurz auf die Hauptgruppen und ihre wichtigsten Verarbeitungsverfahren eingegangen werden kann. Für spezielle Anwendungen ist man auf das Studium der Datenblätter (z.B. [6.8] bis [6.11]), Beratung durch den Hersteller und eigene Versuche angewiesen.

Von den *Kunststoffen* werden vor allem folgende *Eigenschaften* verlangt:

- Unempfindlichkeit gegen mechanische Vibration und Schockbeanspruchung.
- Unempfindlichkeit gegen thermische Wechselbeanspruchung.
- Unempfindlichkeit gegen tiefe und hohe Temperaturen.
- Geringe Wasseraufnahme.
- Geringe Wasserdampfdurchlässigkeit.
- Abdichtung gegen Staub und Gase.
- Gute Haftung auf Metallen und Isoliermaterialien.
- Gute elektrische Werte über den gesamten Einsatztemperaturbereich.
- Keine elektrolytische Korrosion.
- Keine Abgabe von Kondensations- und Abbauprodukten während der Aushärtung und im Dauerbetrieb.

Für Leiterplatten, Moduln und Baugruppen werden überwiegend das Tauchverfahren, das Ein- und Umgießen und das Sinterverfahren verwendet.

6.3.1 Tauchverfahren

Das Tauchen ist eines der einfachsten und billigsten Verfahren für das Aufbringen einer Schutzschicht. Durch das Eintauchen der Komponenten in Schutzlacke oder Gießharzmassen können Schutzschichten mit Dicken von 0,1 bis 1 mm aufgebracht

werden. Die erforderliche Dicke ist von der gewünschten Schutzfunktion, besonders gegen Feuchtigkeitseinwirkungen, abhängig. Die Überzüge werden auch dazu verwendet, bei sehr geringen Abständen zwischen Leiterbahnen und Bauelementen die Bildung von Kriechströmen zu verhindern. Beim Tauchverfahren müssen allerdings unregelmäßige Oberflächen und Außenkonturen in Kauf genommen werden. Das Verfahren wird bevorzugt für Leiterplatten verwendet. Dünne Schutzschichten sind bei verschiedenen Materialien, im Falle späterer Reparaturarbeiten, bei voller Lötkolbentemperatur auslötbar bzw. durchlötbar.

6.3.2 Gießen

Reicht die beim Tauchen erzielbare Dicke der Schicht nicht aus, muß das zu schützende Teil eingegossen werden. Dafür ist eine geeignete Form erforderlich. Bei kleinen elektronischen Baugruppen verwendet man oft «verlorene Formen» aus thermoplastischen Kunststoffen oder Metall, die auf dem Gießling verbleiben und als zusätzlicher Schutz dienen.

Für die meisten Anwendungen kann das Vergießen bei Normaldruck erfolgen. Bei Vergußmassen mit Füllstoffen können Lufteinschlüsse entstehen, die durch Evakuieren vor dem Verguß zu entfernen sind. Bei Baugruppen mit hohen elektrischen Spannungen kann die Anwendung eines Vakuumgießverfahrens erforderlich sein, da sonst die Gefahr des elektrischen Überschlages an den Luften-schlüssen besteht.

6.3.3 Sinterverfahren

Das Aufsintern von pulverförmigen Harzen (Epoxidharze) im Wirbelsinter-, Sprüh- oder Spritzverfahren stellt eine weitere Möglichkeit für das Ummanteln elektronischer Baugruppen dar. Eine Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist allerdings, daß die zu schützenden Komponenten den für das Vorwärmen und Aushärten erforderlichen Temperaturen ausgesetzt werden können. Das Verfahren wird daher vorzugsweise für Baugruppen mit einem keramischen Träger, z.B. Dickschichtschaltkreisen, verwendet.

6.3.4 Härtung

Nach dem Aufbringen der Schutzschicht ist diese auszuhärten. Durch die Härtung entsteht eine zwei- oder dreidimensionale *Vernetzung* der Molekülketten. Ein völlig vernetzter Kunststoff erreicht ein Maximum an Härte, Unquellbarkeit und Unschmelzbarkeit. Beginnt oder verläuft die Härtung bei Raumtemperatur (oder tiefer), so wird diese als Kalthärtung bezeichnet. Der Vorgang wird dabei durch einen Härter ausgelöst oder durchgeführt. Verläuft der Vorgang bei mittleren (30 bis 100 °C) oder höheren Temperaturen (über 100 °C), so bezeichnet man ihn als Warmhärtung oder Heißhärtung. Es ist zu unterscheiden zwischen eigentlichen Härtern und solchen Substanzen, die den Härtungsvorgang nur auslösen.

Die beim *Härtungsprozeß* ablaufenden chemischen Reaktionen sind nicht nur mit einem *Materieumsatz*, sondern auch mit einem *Energieumsatz* verknüpft. Ist der Energieinhalt der Ausgangsstoffe größer als der der entstehenden Produkte, so wird Wärme frei. Der auch bei Vergußmassen auftretende *Temperaturanstieg* darf die Grenzen der thermischen Belastbarkeit der Bauelemente nicht überschreiten.

Diese «Wärmetönung», wie man die Temperatursteigerung bei einer chemischen Reaktion nennt, kann unterschiedlich groß sein. Der Temperaturanstieg wird um so größer sein, je größer die Kunststoffmasse ist und je besser sie gegen Wärmeverlust isoliert ist. Durch die Wärmetönung erhöht sich die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion, wodurch eine schnellere Härtung erreicht wird, verglichen mit Verhältnissen mit guter Wärmeableitung.

Der ebenfalls bei der Härtung auftretende *Volumenschwund* führt zu einer *Druckbeanspruchung* bei den Bauelementen. Bei kritischen Teilen, z.B. Dioden mit Glasgehäuse, sind Vergußmassen mit geringem Volumenschwund auszuwählen.

Von den auf dem Markt befindlichen Kunststoffen haben für den Schutz elektronischer Baugruppen besonders die Silikone, Epoxidharze, ungesättigten Polyesterharze sowie die Polyurethanharze technische Bedeutung erlangt.

6.3.5 Silikone

Der chemische Aufbau dieser umfangreichen Stoffgruppe ist nahe verwandt mit der Struktur widerstandsfähigster anorganischer Materialien wie Quarz. Daraus resultieren viele vorteilhafte Eigenschaften (nach [6.9]).

Kaltvulkanisierender Silikonkautschuk besitzt hohe elektrische Isolierwirkung, gutes Wärmeleitvermögen und hervorragende Ozonbeständigkeit. Die *Vulkanisation* (Übergang vom plastischen in den elastischen Zustand) erfolgt bei Raumtemperatur. Bei den Zweikomponenten-Systemen erfolgt diese nach Zugabe eines Härters, bei den Einkomponenten-Systemen allein durch die Einwirkung der Luftfeuchtigkeit. Spezielle Versionen sind hitzebeständig bis + 300 °C. Kaltvulkanisierender Silikonkautschuk dient u.a. als Einbettmasse für elektronische Bauelemente.

Heißvulkanisierender Silikonkautschuk ist sehr oxidations- und temperaturbeständig sowie feuchtigkeitsabweisend. Er behält sowohl bei tiefen Temperaturen (Spezialtypen bis -100 °C) als auch bei hohen Temperaturen seine elastischen Eigenschaften. Die wichtigsten elektrischen und mechanischen Eigenschaften bleiben im gesamten Temperaturbereich nahezu konstant. Anwendungen sind u.a. die Herstellung hochspannungsfester Leitungen für Fernsehgeräte und die Elektrodenisolation. Es stehen auch elektrisch leitfähige Mischungen für flexible Elemente zum Ableiten statischer Aufladungen sowie zum Abschirmen elektromagnetischer Felder zur Verfügung.

Silikonharze verbinden hohe Wärmebeständigkeit mit sehr guten elektrischen Eigenschaften. Sie sind stark wasserabweisend, beständig gegen Oxidation, Ozon und Koronaentladungen und weisen sehr gute Beständigkeit gegen Röntgen- und

Korpuskularstrahlung auf. Sie sind bakterien-, schimmel- und tropenfest. Sie dienen als Bindemittel für Form- und Schichtstoffe (Isolierstoffe) aus anorganischen Materialien (Glasseeide, Glimmer, Quarz, Asbest), Tauch- und Tränklacke für Transformatoren, Widerstände, Kondensatoren sowie als Abdecklacke für pn-Übergänge in Halbleitern und temperatur- und strahlenbeanspruchte Oberflächen.

Silikonpasten sind vaselineartige, nicht schmelzende und nicht verharzende Massen mit sehr gutem physikalischen Verhalten in einem Temperaturbereich von -50 bis über $+200$ °C. Spezielle Typen haben besonders gutes Wärmeleitvermögen (Wärmeleitpasten für Halbleiter, Kühlkörper) oder sehr hohe Reinheit.

6.3.6 Epoxidharze

Epoxidharze haben sehr gute mechanische, thermische und elektrische Eigenschaften sowie gute Wärmealterungsbeständigkeit. Sie haften sehr gut auf fast allen Werkstoffen und haben eine sehr hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuchtigkeit und den meisten chemischen Substanzen. Aufgrund seiner Festigkeit kann das Material auch tragende Funktionen übernehmen. Der Schwund bei der Härtung ist gering. Daher können auch größere Werkstücke in einem Stück ohne Ribbildung umgossen werden. Die gute Haftfestigkeit ermöglicht die Herstellung von staub- und feuchtigkeitsdichten Baugruppen. Epoxidharze werden auch bevorzugt verwendet, wenn eine Analyse von Aufbau und Funktion einer Schaltung oder Baugruppe verhindert werden soll. Die Eigenschaften der Epoxidharzformstoffe lassen sich durch den verwendeten Härter sowie durch Füllstoffe beeinflussen und dadurch an bestimmte Anwendungsgebiete anpassen.

6.3.7 Ungesättigte Polyesterharze

Ungesättigte Polyesterharze besitzen eine sehr gute Wärmebeständigkeit. Sie werden bevorzugt als Tränklarze für Wicklungen verwendet. Durch ihren günstigen Preis und einige verarbeitungstechnische Eigenschaften (z.B. gute Entformbarkeit) werden sie zum Umguß kleiner Einbaueinheiten eingesetzt, die in großen Serien auf automatischen Gießanlagen gefertigt werden, wie z.B. Zeilentransformatoren und Hochspannungskaskaden von Fernsehgeräten. Obwohl sie eine hohe Elastizität besitzen, werden sie für elektronische Baugruppen weniger eingesetzt. Es besteht eine gewisse Gefahr, daß Bauelemente durch Lösungsmittel (Styrol) beeinflusst werden.

6.3.8 Polyurethanharze

Je nach Aufbau der chemischen Komponenten lassen sich weiche, flexible oder harte Gießharzformstoffe auf der Basis der gesättigten Polyurethanharze herstellen. Wegen der geringen Volumenschwindung bei der Härtung und der geringen Wärmetönung verwendet man die flexiblen Typen dieser Harze bevorzugt in der Elektronik für den Verguß von Leiterplatten und Moduln. Die Elastizität bleibt in

einem weiten Temperaturbereich sowie nach der Alterung erhalten. Durch die gute Witterungsbeständigkeit eignet sich das Material auch für den Einsatz im Freien.

6.4 Pflichtenhefte für Umweltbedingungen

Neben der eindeutigen Festlegung der elektrischen oder elektromechanischen Funktion eines Gerätes ist es erforderlich, die zu erwartenden Umweltbedingungen vor dem Beginn der Entwicklungsarbeiten zu ermitteln sowie die Brauchbarkeitsdauer unter diesen Bedingungen festzulegen.

Die Angaben sind zunächst für die Umwelt des Gerätes zu ermitteln und dann auf die Bauelemente im Geräteinnern zu übertragen.

Zur Aufstellung entsprechender Fragebögen, die zusammen mit dem Vertrieb bzw. Kunden ausgefüllt werden sollten, kann die folgende Liste dienen.

Thermische Beanspruchung

- Minimale und maximale Temperatur im Betrieb und bei Lagerung bzw. Transport.
- Evtl. Einwirkungsdauer der Extremwerte.

Klimatische Beanspruchung

- Montageort des Gerätes (trockene, feuchtigkeitsgefährdete, feuchte Räume, Außenräume, Freiluft, auf Fahrzeugen).
- Relative Luftfeuchtigkeit im Jahresmittel. Maximalwert ... % während ... Tagen. Siehe DIN 40040.
- Temperaturdifferenz zwischen Geräte- und Außenatmosphäre im Betrieb. Max. ... °C, min. ... °C.
- Betriebsunterbrechungen. Dauer, Häufigkeit? Fallen Betriebsunterbrechungen und Feuchtigkeitsmaxima zusammen?
- Treten Tropf-, Sprüh-, Spritz- oder Strahlwasser auf?

Zusätzliche Beanspruchungen

- Sehr staubige Umgebung? Art des Staubes?
- Industrielatmosphäre, chemisch aggressive Gase? Art und Konzentration?
- Betrieb in Meeresnähe?
- Betrieb in explosionsgefährdeter Umgebung?
- Strahlungseinflüsse durch Radioaktivität?
- Sonstige Einflüsse?

Mechanische Beanspruchungen

- Besondere mechanische Beanspruchungen durch Schwingungen, Stöße, Erschütterungen oder Beschleunigung während Transport, Lagerung oder Betrieb?

Tabelle 6.4 Beispiel für Umweltbedingungen bei Geräten der Industrieelektronik (nach [6.7], ergänzt)

Äußere Einflußgröße bzw. Kriterium	Wertebereich, Bemessungsvorschrift
Umgebungstemperatur Betrieb Lagerung	− 10 °C... + 40 °C − 40 °C... + 70 °C
Feuchte (trockene Innenräume)	An 60 Tagen im Jahr 85% r.F., sonst im Mittel 65%, Betauung nicht zulässig (Klasse G nach DIN 40040 [2.6])
Luftverunreinigungen	Da keine besonderen Schutzmaßnahmen vorgesehen sind, muß Luft von Staub und aggressiven Gasen frei sein
Schwingfestigkeit	Prüfung mit 2,5 g bei 25 Hz entsprechend ± 1 mm Amplitude in 3 aufeinander senkrechten Ebenen je 20 Minuten
Schockfestigkeit	Max. 30 g Beschleunigung
Aufstellungshöhe	≤ 1000 m über dem Meeresspiegel
Spannungsversorgung	Nennspannung $\begin{cases} + 10\% \\ - 15\% \end{cases}$ Nennfrequenz $\pm 1\%$
Störspannungen	$\pm 100\%$ der Netzspitzenspannung während ≤ 10 ms
Funkentstörung	Nach VDE 0875
Berührungsspannungsschutz	Schutzerdung bzw. Nullung gemäß VDE 0100 [7.1] für Teile mit höheren Betriebsspannungen als 42 V
Kriech- und Luftstrecken	Nach VDE 0110 [7.1]

Elektrische Beanspruchungen

- Normal-, Minimal- oder Maximalspannung. Frequenz einschl. Toleranz?
- Sind Überspannungen zu erwarten? Art, Amplitude, Häufigkeit?
- Sind hochfrequente Störer vorhanden?

Besondere Erfahrungen

- Haben sich am Einsatzort bestimmte Werkstoffe und Oberflächenbehandlungen bewährt bzw. nicht bewährt?
- Anforderungen an Gerätegehäuse (hermetisch dicht, atmende Dichtung, Ausgleichsöffnung).
- Treten besondere Beanspruchungen bei Lagerung, Transport und Montage auf?
Ist ein Gerät für den Einsatz in trockenen Räumen ohne besondere Umwelteinflüsse vorgesehen, lassen sich die Werte in Tabelle 6.4 als Anhalt verwenden.

6.5 Simulation der Umwelteinflüsse

Ob die in den Pflichtenheften geforderten Eigenschaften hinsichtlich der Funktion unter allen vorkommenden Umweltbedingungen während der geforderten Brauchbarkeitsdauer wirklich erreicht werden, kann nur der praktische Einsatz zeigen. Da dieses Verfahren wegen der hohen Unsicherheiten und Risiken i.a. nicht praktikabel ist, wird man durch entsprechende Prüfungen versuchen, möglichst noch während der Entwicklung die Eignung der Komponenten und des Gerätes nachzuweisen. Dieses wird entweder der Kunde selbst fordern (Weltraumgeräte, militärische Geräte) oder der Hersteller aus eigenem Interesse durchführen.

Die Laboruntersuchungen sollen in möglichst kurzer Zeit Aussagen darüber liefern, wie sich der Prüfling in längeren Zeiträumen verhält. Man muß also durch Überhöhung der vorhandenen Einflüsse schärfer prüfen, als die späteren Einwirkungen sein werden.

Der Zeitraffung bei Prüfungen sind jedoch Grenzen gesetzt, da beispielsweise bei zu starker Temperaturerhöhung die physikalischen und chemischen Reaktionsmechanismen anders ablaufen können als unter normalen Bedingungen. Diese Tests erfordern sehr viel Erfahrung und genaue Kenntnisse der Vorgänge, da andernfalls falsche Schlüsse gezogen werden können.

Man arbeitet oft mit einer Steigerung der vorhandenen Einflüsse um 30%, wobei die erforderliche Erprobungsdauer von der Art der Prüfung abhängt. Erschwerend kommt hinzu, daß im praktischen Einsatz i.a. mehrere Einflüsse gleichzeitig auftreten, z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und Vibration. Aus Kostengründen wird man sich oft darauf beschränken, die einzelnen Einflüsse nacheinander nachzubilden, wobei unter Umständen verschiedene Effekte nicht erkannt werden.

Die erforderlichen Einrichtungen sind außerordentlich aufwendig und teuer. Da die Kosten einer Prüfung mit der Größe und dem Gewicht der Prüflinge steigen, wird man versuchen, die Untersuchungen mit den kleinstmöglichen, selbständig funktionierenden Baugruppen zu beginnen. Dabei zeigt es sich häufig, daß Verbesserungen an den Testobjekten erforderlich sind. Man wird daher nach Möglichkeit schon parallel zur Entwicklung prüfen.

Eine Temperatur- oder Klimatestkammer gehört zur Minimalausrüstung für Umwelttests. Eine Vibrationseinrichtung ist häufig erforderlich. Man kann sich auch der Umweltlabors verschiedener Großfirmen bedienen. Dieses ist jedoch nur wirtschaftlich bei gelegentlichen oder sehr speziellen Untersuchungen.