

4 Antwortspektrum-Analyse (response spectrum analysis)

4.1 Was ist eine Antwortspektrum-Analyse?

Unter einer Antwortspektrum-Analyse versteht man, dass die Ergebnisse einer Modalanalyse zusammen mit einem bekannten Antwortspektrum verwendet werden, um die maximalen Verschiebungen und Spannungen in einem Modell zu berechnen. Dies wird im wesentlichen anstelle von einer transienten Analyse im Zeitbereich verwendet, um die Antwort von Strukturen auf langanhaltende Erregungen, wie z.B. Erdbebenbelastung, Windlasten, Belastung durch Meereswellen, Strahltriebwerksschub, Vibration von Raketenantrieben u.s.w zu berechnen. In der Regel wird diese Methode zum Nachweis der Standsicherheit von Bauwerken angewandt. Mit der Methode kann aber auch untersucht werden, wie stark Eigenschwingungen durch einen gegebenen Lastvektor zum Schwingen angeregt werden können (participation factor).

Das Spektrum ist einfach eine Kurve einer spektralen Größe über der Frequenz, die die Intensität und Frequenzanteile von zeitvariablen Lasten enthält. Ein Antwortspektrum repräsentiert die Antwort (response) von Einmassenschwingern auf eine bestimmte zeitabhängige Lastfunktion. Es handelt sich dabei um eine Kurve der maximalen Schwingantwort über der Eigenfrequenz, wobei die Antwort eine Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Kraft sein kann. Bei einer *Single-point Response Spectrum Analysis* (SPRS) wird ein Antwortspektrum für eine Anzahl von Knoten im Modell, z.B. alle Lagerpunkte des Bauteils, spezifiziert.

Die Antwortspektrum-Methode (Response Spectrum) mit Einfachanregung (Single-Point Response Spectrum, SPRS, Beispiel: Turm) ist die am häufigsten verwendete Analyse. Zu dieser Methode werden in den folgenden Abschnitten Handhabungshinweise gegeben. Von geringerer Bedeutung (da sie nur Sonderfälle und spezielle Bereiche der Technik betreffen) sind Methoden wie die Antwortspektrum-Methode mit Mehrfachanregung (Multi-Point Response Spectrum, MPRS, Beispiel: Rohrleitungsstrang in einer Kraftwerksanlage), die Dynamic Design Analysis Method (DDAM) oder die Analyse einer spektralen Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD). Diese Methoden werden hier nicht weiter betrachtet, hierzu wird auf die Online-Dokumentation des ANSYS/ED-Programms verwiesen.

4.2 Wie eine Antwortspektrum-Analyse durchgeführt wird

Die Vorgehensweise bei einer Antwortspektrum-Analyse setzt sich aus den Arbeitsschritten der vorbereitenden Modalanalyse

1. Modellerstellung (preprocessing)
2. Durchführung der Modalanalyse mit Expansion (solution)
und den folgenden Schritten zusammen, bei denen die Eigenfrequenzen und Eigenformen verwendet werden
3. Berechnen der Lösung der Antwortspektrum-Analyse
4. Auswertung der Ergebnisse (postprocessing)

Die Modalanalyse wird benötigt, da die Eigenfrequenzen und die Eigenschwingungsformen verfügbar sein müssen, um die Antwortspektrum-Analyse durchzuführen.

4.3 Vorbereitende Arbeitsschritte

4.3.1 Modellerstellung (preprocessing)

/PREP7

Main Menu> Preprocessor

Bei diesem Schritt werden Jobname und der Titel der Analyse spezifiziert und anschließend im Prozessor PREP7 die Elementtypen, Real Constants, die Materialeigenschaften und das Geometriemodell definiert. Diese Aufgaben sind für die meisten Analysen gleichartig auszuführen, sie sind in Kapitel 2 beschrieben. Für eine Antwortspektrum-Analyse sollten die folgenden zusätzlichen Punkte beachtet werden.

ET,..

Main Menu> Preprocessor> Element Type

Nur lineares Verhalten ist für eine Antwortspektrum-Analyse zulässig. Nichtlineare Elemente, wenn vorhanden, werden als lineare behandelt. Verwenden Sie z.B. Kontaktelemente, dann wird deren Steifigkeit aus dem Anfangsstatus berechnet und in der weiteren Analyse nicht mehr geändert.

MP,..

Main Menu> Preprocessor> Material Props

Sowohl der E-Modul (EX) (oder in einigen Fällen die Steifigkeit) als auch die Dichte (DENS) (oder in einigen Fällen die Masse) muss definiert sein. Materialeigenschaften können linear, isotrop oder orthotrop sowie konstant oder temperaturabhängig sein. Nichtlineares Materialverhalten, wenn vorhanden, bleibt unberücksichtigt.

4.3.2 Durchführung der Modalanalyse und Expansion (solution)

/SOLU

ANTYPE,MODAL

Main Menu> Solution> Analysis Type> New Analysis

Die Ergebnisse der Modalanalyse - Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen - werden benötigt, um die Antwortspektrum-Analyse durchzuführen. Dabei sollten die folgenden zusätzlichen Punkte berücksichtigt werden.

MODEPT,..

Main Menu> Solution> Analysis Options

Entweder das Block-Lanczos-Verfahren, die Unterraummethode (subspace) oder das Householderverfahren müssen für die Berechnung der Eigenschwingungsformen verwendet werden. Die anderen beiden Methoden - für unsymmetrische Matrizen oder gedämpfte Systeme - sind für die folgende Antwortspektrum-Analyse nicht anwendbar. Die Anzahl der berechneten Eigenfrequenzen sollte groß genug sein, um die Antwort der Struktur in dem zu berücksichtigenden Frequenzbereich ausreichend genau abzubilden.

MP,DAMP,..

Main Menu> Preprocessor> Material Props

Die ursprüngliche Bedeutung der Eingabe **MP,DAMP** ist die Definition eines materialabhängigen Faktors β für die Steifigkeitsmatrix. Diese Art der Dämpfung ist für Antwortspektrum-Analysen nicht verfügbar. Bei diesen Analysen hat diese Eingabe eine andere Bedeutung. Mit dem Zahlenwert der Eingabe wird hier ein materialbezogenes Lehrsches Dämpfungsmaß eingegeben. Die Eingabe muss schon vor der Durchführung der

Modalanalyse erfolgen. Während der Modalanalyse berechnet das ANSYS/ED-Programm daraus modale Dämpfungsmaße für alle Eigenfrequenzen und gibt diese automatisch als Eingabe MDAMP ein (eine spätere Benutzer-Eingabe von MDAMP überschreibt dies). Dazu ist bei der Modalanalyse eine Expansion der Eigenformen mit Elementgrößen unbedingt erforderlich.

D,..

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply

Stellen Sie sicher, dass alle Freiheitsgrade, an denen ein Spektrum zur Fußpunkterregung angreifen soll, festgehalten sind.

Es wird empfohlen, die Modalanalyse und die Expansion der Eigenschwingungsformen gemeinsam auszuführen. Dies geschieht, indem bei der Definition der Modalanalyse die Eingabe

MXPAND,..

Main Menu> Solution> Define Load Step Opts> Expansion Pass

verwendet wird. Dadurch werden alle notwendigen Daten zur Weiterverarbeitung in der Antwortspektrum-Analyse in den entsprechenden Dateien gespeichert.

Bei sehr großen Modellen kann es ratsam sein, die Expansion der Eigenformen erst nach der Spektrumanalyse, aber vor der Eigenform-Überlagerung (z.B. mit SRSS) in einem separaten Expansionslauf mit

/SOLU

EXPASS,ON

Main Menu> Solution> Define Analysis Type> Expansion Pass

MXPAND,..

Main Menu> Solution> Define Load Step Opts> Expansion Pass

durchzuführen. Dabei hat man die Möglichkeit, die Expansion auf die signifikanten Eigenformen (d.h. die einen maßgebenden Anteil an der Antwort haben) zu beschränken. Dies spart bei großen Modellen Rechenzeit und Plattenplatz, lässt aber die Verwendung von MP,DAMP (siehe oben) nicht mehr zu.

Beim Expandieren der Eigenformen sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Für die Antwortspektrum-Analyse können nur expandierte Eigenschwingungsformen berücksichtigt werden.
- Sind als Ergebnis der Antwortspektrum-Analyse auch Elementergebnisse (Spannungen, Reaktionskräfte,...) gewünscht, dann muss schon bei der Expansion der Eigenformen die Berechnung der Elementgrößen angefordert werden [**MXPAND,NMODE,,YES**]. In Voreinstellung werden keine Spannungen bei der Expansion berechnet, was bedeutet, dass als Ergebnis der Antwortspektrum-Analyse nur Verschiebungen verfügbar sind.

Die Vorgehensweise bei einer Antwortspektrum-Analyse wird nachfolgend erläutert. Die Datei mit den Eigenschwingungsformen (*Jobname.MODE*) der Modalanalyse muss dazu verfügbar und in der Datenbasis das gleiche Modell, für das die Modalanalyse durchgeführt worden ist, enthalten sein.

4.4 Durchführung der Single-Point Response Analyse (SPRS)

4.4.1 Start des Lösungsabschnitts

/SOLU

Main Menu> Solution

Starten Sie den Lösungsabschnitt.

4.4.2 Definition des Analysetyps

ANTYPE,SPECTRUM,..

Main Menu> Solution> Define Analysis Type> New Analysis

[ANTYPE] Type of Analysis

Wählen Sie **Spectrum**.

4.4.3 Analyse-Optionen

SPOPT,SPRS,NMODE

Main Menu> Solution> Analysis Options

Wählen Sie **Single-pt resp (SPRS)**.

NMODE No. of modes for solu

Diese Eingabe legt die Anzahl der Eigenformen, die für die Analyse verwendet werden sollen, fest. Wählen Sie genügend Eigenformen, um den Frequenzbereich, der durch das Spektrum überspannt wird, abzudecken und die Antwort der Struktur zu charakterisieren. Die Genauigkeit der Lösung hängt von der Anzahl Eigenformen, die verwendet werden, ab: Je größer die Anzahl, desto höher die Genauigkeit. Alle Eigenschwingungsformen müssen expandiert sein.

4.4.4 Load Step Options (Optionen zur Lastfallsteuerung)

Dämpfung

Main Menu> Solution>Load Step Opts> Time/Frequenc> Damping

Für die Rayleigh-Dämpfung steht der Koeffizient für die Steifigkeitsmatrix (Steifigkeitsdämpfung)

BETAD,VALUE

[BETAD] Stif. Matrix multiplier

und für ein Lehrsches Dämpfungsmaß

DMPRAT,RATIO

[DMPRAT] Constant damping ratio

zur Verfügung. **BETAD** erzeugt ein frequenzabhängiges Dämpfungsmaß, wohingegen **DMPRAT** ein für alle Frequenzen gleichbleibendes Dämpfungsmaß definiert.

Darüber hinaus steht eine modale Dämpfung zur Verfügung. Die Eingabe erfolgt mit

MDAMP,STLOC,V1,V2,V3,V4,V5,V6

[MDAMP] Modal Damping

Damit können Dämpfungsmaße für jede Eigenfrequenz eingegeben werden. Die Eingabe der Zahlen erfolgt über eine Wiederholung der Einträge in die Tabelle (bei Eingabe im

Menüsystem) oder eine wiederholte Anwendung des Kommandos mit jeweils unterschiedlichen Startwerten (STLOC). Der Startwert bezeichnet die Nummer der Eigenfrequenz, ab der die neuen Werte einzutragen sind. Diese Vorgehensweise entspricht der Eingabe von Material-Tabellenwerten im Preprocessing. Das ANSYS/ED-Programm berechnet aus allen eingegebenen Dämpfungswerten ein effektives Dämpfungsmaß für jede Eigenfrequenz, d.h. wird mehr als eine Form von Dämpfung eingegeben, so wird die Wirkung aufaddiert (außer **MP,DAMP** und **MDAMP**).

Spektrum-Daten

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum

Diese Festlegungen des Spektrums für die Single-Point Response Spectrum Analyse beinhalten die Art des Antwortspektrums [**SVTYPE**], die Richtung der Anregung [**SED**], die tabellarische Eingabe der Spektralwerte gegenüber der Frequenz [**FREQ,SV**] und die Methode zur Kombination der Eigenschwingungsformen.

SVTYPE,KSV,FACT

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> SinglePt> Settings

Der Typ des Spektrums [**SVTYPE**] kann auf Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft oder spektrale Leistungsdichte bezogen sein. Alle Spektren, mit Ausnahme des Kraftspektrums, repräsentieren seismische Spektren, d.h. sie werden als am Fundament (oder auch der Einspannung) der Struktur wirkend angenommen. Das Kraftspektrum wird mit **F** oder **FK** an Knoten, die nicht zur Einspannung (oder dem Fundament) gehören, spezifiziert, wobei die Richtung durch die Labels FX, FY oder FZ eingegeben wird. Bei seismischer Anregung wird die Belastungsrichtung mit

SED,...

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> SinglePt> Settings

vorgegeben. Die Eingabe von

ROCK,...

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> SinglePt> Settings

ermöglicht die Spezifikation der Wirkungsrichtung bei einem "Schaukelspektrums" (Rocking Spectrum).

Die Kommandos

FREQ,...

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> SinglePt> Freq Table

SV,...

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> SinglePt> Spectr Values

werden angewendet, um die Wertepaare des Spektrums einzugeben (**FREQ** für die Eingabe der Frequenzen, **SV** für die Eingabe der Spektralwerte). Dabei gelten die Spektralwerte immer für ein bestimmtes Dämpfungsmaß. Es können für mehrere unterschiedliche Dämpfungsmaße Spektralwerte eingegeben. Benötigt das Programm Spektralwerte für ein Dämpfungsmaß, für das keine Kurve eingegeben wurde, so erfolgt eine logarithmische Interpolation. Benötigt das ANSYS/ED-Programm Spektralwerte für Dämpfung Null, so wird die Kurve mit dem kleinsten Dämpfungsmaß verwendet.

Verwenden Sie

STAT

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum > Show Status

Utility Menu> List> Status> Solution> Spectrum Options

um die momentanen Werte des Spektrums aufzulisten.

Es kann eine der folgenden fünf Methoden

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Spectrum> Mode Combine

zur Kombination der Eigenschwingungsformen gewählt werden:

- Complete Quadratic Combination (CQC),
- Grouping (GRP),
- Double Sum (DSUM),
- Square Root of Sum of Squares (SRSS) oder
- die NRL-Sum (DDAM).

Die Methode zur Kombination der Eigenschwingungsformen bestimmt, wie die modalen Antworten der Struktur (die Verschiebungen und Spannungen für jede Eigenschwingungsform) miteinander kombiniert werden. Während des Lösungsvorganges berechnet ANSYS die Faktoren und Koeffizienten, die zur Kombination der Eigenschwingungsformen erforderlich sind und schreibt eine Datei mit POST1-Kommandos (*Jobname.MCOM*). Diese Datei wird dann vom Anwender im Prozessor POST1 eingelesen, um damit unter Anwendung der Ergebnisdatei für Strukturanalysen (*Jobname.RST*) des Expansion Pass der Modalanalyse die Kombination der Eigenschwingungsformen durchzuführen.

4.4.5 Berechnen der Lösung

Starten der Berechnung der Lösung mit

SOLVE

Main Menu> Solution> Solve> Current LS

Die Ausgabe der Lösung besteht aus der Tabelle mit den Partizipationsfaktoren und, wenn eine Kombinationsvorgabe gewählt wurde, der Datei mit den Postprocessoranweisungen zum kombinieren der Eigenschwingungsformen (*Jobname.MCOM*). Die Tabelle der Partizipationsfaktoren, die Teil der gedruckten Ausgabe ist, listet die Partizipationsfaktoren, Koeffizienten der Eigenschwingungsformen (basierend auf dem kleinsten Dämpfungsmaß) und die Massenverteilung für jede Eigenform auf. Die Koeffizienten der Eigenschwingungsformen werden zur Multiplikation mit den Eigenschwingungsformen verwendet, um die maximale Antwort für jede Eigenform (Modale Antwort) zu bekommen. *Jobname.MCOM* enthält POST1-Kommandos, die die Kombination der maximalen modalen Antworten in einer vom Anwender festgelegten Weise durchführen, um die Gesamtantwort der Struktur zu berechnen.

*Warnung: Die Ausgabe wird an die Datei mit den kombinierten Eigenschwingungsformen (*Jobname.MCOM*) angehängt, wenn diese Datei in dem aktuellen Verzeichnis (Directory) schon vorhanden ist. Obwohl dies für Strukturen nützlich sein kann, die durch mehrere Anregungen belastet werden und bei denen der Effekt aus der Kombination der Eigenschwingungsformen erwünscht ist, so kann es doch unbeabsichtigte Effekte verursachen, wenn Sie mit einer neuen Analyse beginnen!*

Ist die Analyse von weiteren Antwortspektren erforderlich, wiederholen Sie die Schritte 4.4.4 und 4.4.5.

4.4.6 Auswertung der Ergebnisse (postprocessing)

Die Ergebnisse einer Single-Point Response Spectrum Analysis werden auf die Datei mit den kombinierten Eigenformen, *Jobname.MCOM*, in Form von POST1-Kommandozeilen geschrieben. Die Gesamtantworten (Overall Responses) bestehen aus den Gesamt-

verschiebungen und den Gesamtspannungen, -dehnungen und -reaktionskräften, sofern diese während des erweiterten Rechenlaufs (Expansion Pass) auf die Ergebnisdatei übertragen worden sind.

Der allgemeine Postprocessor POST1 wird zur Auswertung der Ergebnisse verwendet. Der erste Schritt ist das Lesen der auf *Jobname.MCOM* gespeicherten Befehle mit Hilfe der Eingabe

```
/INPUT,jobname,MCOM  
Utility Menu> File> Read Input from
```

Anschließend können die verformte Struktur [**PLDISP**], Konturplots von Spannungen, Dehnungen etc. [**PLNSOL** oder **PLESOL**], oder Vektorplots von vektoriellen Größen [**PLVECT**] dargestellt werden. Um tabellarische Listen zu erhalten, wenden Sie die Befehle **PRNSOL**, **PRESOL**, **PRRSOL** etc. an. Es ist aber zu beachten, dass in den grafischen Darstellungen an jedem Ort im Modell Werte dargestellt werden, die zu jeweils unterschiedlichen Zeitpunkten gehören. Damit ist insbesondere eine Darstellung der deformierten Struktur kaum sinnvoll. Diese Abbildungen sind sehr schwer zu interpretieren oder Dritten verständlich zu machen. Die Darstellung der deformierten Struktur kann mit **/DSCA,,OFF** abgeschaltet werden.

Eine Vielzahl weiterer Funktionen, wie z.B. die Abbildung von Ergebnisgrößen auf Pfade, Lastfallkombinationen etc., sind im allgemeinen Postprocessor POST1 verfügbar.

4.5 Beispiel

Die nachfolgend gezeigte Eingabesequenz zeigt die maßgebenden Kommandoingaben, mit denen eine Antwortspektrum-Analyse ausgeführt werden kann.

```
/SOLU ! MODALANALYSE  
ANTYPE,MODAL  
MODOPT,LANB,20  
MXPAND,20,,,YES ! EXPANSION DER EIGENFORMEN (OPTIONAL)  
SOLVE  
/SOLU ! ANTWORTSPEKTRUMANALYSE  
ANTYPE,SPECTRUM  
SPOPT,SPRS ! SINGLE POINT RESPONSE SPECTRUM  
SVTYP,2 ! SEISMISCHES BESCHLEUNIGUNGSSPEKTRUM  
FREQ, 0.1,50,200,600 ! FREQUENZPUNKTE  
SV,0.02,10.,50.,50.,20. ! BESCHLEUNIGUNGSWERTE BEI 2% DÄMPFUNG  
DMPRAT,0.02 ! DÄMPFUNG  
SED,0.0,1.0,0.0 ! BELASTUNGSRICHTUNG  
SOLVE  
/SOLU ! NACHTRÄGLICHE EXPANSION  
! DER SIGNIF.EIGENFORMEN  
ANTYPE,MODAL  
EXPASS,ON  
MXPAND,20,,,YES,0.001  
SOLVE  
/SOLU ! BERECHNUNG DER EIGENFORMÜBERLAGERUNG  
ANTYPE,SPECTRUM  
SRSS,0.001,DISP
```

SOLVE
/POST1 **! AUSWERTUNG**
/INP,,MCOM ! DURCHFÜHREN DER EIGENFORMÜBERLAGERUNG

4.6 **Kurzdarstellung der ANSYS/ED Programmeingaben**

In dieser Kurzdarstellung sind die Eingaben zusammengefasst, die für die Steuerung und den Start sowie zur Auswertung einer Antwortspektrum-Analyse geeignet sind. Ein ungeübter Anwender sollte diesen Abschnitt überspringen. Dem geübten Anwender dient diese Kurzdarstellung als Anhaltspunkt.

4.6.1 **Lösungsabschnitt (solution)**

Aufruf des Lösungsteils

/SOLU

Main Menu> Solution

Auswahl des Analysetyps

ANTYP,SPECTRUM

Main Menu> Solution> Analysis Type> New Analysis

Antype SPECTRUM

Transiente Analyse Option

SPOPT,Sptype,NMODE

Main Menu> Solution> Analysis Type> Analysis Options

[SPOPT] Spectrum Analysis Option

Sptype SPRS Single-Point Response Spectrum Methode

Randbedingungen (Festhaltungen für seismische Belastung)

D,... KD, ...

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply

Belastungen (nur bei Vorgabe eines Kraftspektrums)

F,... KF

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply

Dämpfung, Rayleigh-Dämpfung

BETAD,VALUE

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequenc> Damping

Dämpfung über Lehrsches Dämpfungsmaß

DMPRAT,RATIO

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequenc> Damping

Modale Dämpfung

MDAMP,STLOC,V1,V2,V3,V4,V5,V6

Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequenc> Damping

Spektrum-Daten

SVTYPE,KSV,FACT

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Settings

FREQ,FREQ1,...,FREQ9

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Freq Table

SV,DAMP,SV1,...,SV9

Main Menu> Solution> -Load Step Opts- Spectrum> Spectr Values

Kontrolle der Spektrum-Daten

STAT

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Show Status

Utility Menu> List> Status> Solution> Spectrum Options

Belastungsrichtung bei seismischer Anregung

SED,SEDX,SEDY,SEDZ

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Settings

oder

ROCK,CGX,CGY,CGZ,OMX,OMY,OMZ

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Settings

Überlagerungsmethode

CQC,SIGNIF,Label

DSUM,SIGNIF,Label,TD

GRP,SIGNIF,Label

SRSS,SIGNIF,Label

NRLSUM,SIGNIF,Label

Main Menu> Solution> Load Step Opts>Spectrum> SinglePt> Settings

Start der Berechnung

SOLVE

Main Menu> Solution> Solve> Current LS

4.6.2 Auswertung mit dem allgemeinen Postprocessor (POST1)

Einlesen der Ergebnisse

/INP,jobname,MCOM

Utility Menu> File> Read Input from

Konturdarstellung von Knoten-Ergebniswerten

PLNSOL,....

Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solution

Konturdarstellung von Element-Ergebniswerten

PLESOL,....

Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Element Solu

Liste von Knoten-Ergebniswerten

PRNSOL,....

Main Menu> General Postproc> List Results