

Optimierung der Rohrbeanspruchungen, Halterungs- und Komponentenanschlußlasten während der Planung von Rohrleitungssystemen

Optimization of pipe loadings, mounting and component connecting loads during the piping-system planning phase

Die beschriebene Berechnungsmethode ermöglicht die Optimierung von Halterungskonzepten von Rohrleitungssystemen während der Planung und reduziert die Zahl der Iterationsschritte auf ein Minimum. Durch die Benutzung von optimalen Halterungskonzepten in Form von Repräsentanten kann auf die Berechnung der gesamten Isometrie des Systems in den meisten Fällen verzichtet werden. Die Repräsentanten ermöglichen die Variation sämtlicher relevanter Parameter. Dadurch können die Beanspruchungen in den Rohrbauteilen und Einbauten schon während der Planung minimiert werden. Der Einfluß der weiterführenden Rohrschnitte wird dabei durch Erfahrungswerte in Form von Anschlußsteifigkeiten berücksichtigt.

Teile der Methode der Repräsentanten können von den Komponentenherstellern, unter Berücksichtigung der Spannungen und Verformungen in den Komponenten, zur Festlegung von zulässigen Stützweiten der anschließenden Rohrsysteme benutzt werden. Dadurch erübrigt sich in den meisten Fällen eine Abstimmung zwischen Komponente und Rohrleitung, wenn die von der Komponentenseite angegebenen zulässigen Bereiche durch das realisierte Halterungskonzept eingehalten werden. Die beschriebene Methode der Repräsentanten führt zu Ergebnissen, die nicht wesentlich von den Ergebnissen einer numerischen Berechnung des gesamten Systems abweichen.

The calculation method described makes possible optimization of piping-system support and mounting concepts during the planning phase and reduces the number of iteration steps to a minimum. The use of optimum mounting and support concepts in the form of representative elements in most cases makes it possible to dispense with computation of the system's complete isometrics. The representative elements permit variation of all relevant parameters. The loads in piping components and internals can therefore be minimized as early as the planning stage. The influence of connecting pipe systems is taken into account by means of empirical values in the form of connecting stiffnesses.

Provided the stresses and deformations in the components are taken into account, elements of the representative element method can be used by component manufacturers for definition of the permissible support intervals for the incoming and outgoing pipe systems. This means that matching of component and pipeline can be dispensed with in most cases provided the mounting and support concept implemented adheres to the permissible ranges dictated by the component side. The representative element method described produces results which do not differ significantly from those obtained via numerical computation of the entire system.

Verfahrenstechnische, chemische und Kraftwerksanlagen bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten, die in der Regel durch Rohrleitungen mit ihren Stellorganen miteinander zu einem System verbunden sind. Dazu gehören ferner die Halterungen der Komponenten und Rohrleitungen. Das so definierte System ist nur dann in der Lage, die betrieblichen und sonstigen aus dem Schutz der Anlage und der Umgebung sich ergebenden

Anforderungen zu erfüllen, wenn die auf die einzelnen Bauteile während des gesamten Betriebes wirkenden Belastungen die jeweiligen zulässigen Belastungen nicht überschreiten. Der Nachweis der Eignung eines Systems für den vorgesehenen Betrieb muß in den meisten Fällen vor der Inbetriebnahme der Anlage erfolgen.

Die Belastungen eines Systems bestehen aus der Summe von vielen Einzella-

Dipl.-Ing. Thomas Brümmer



Projektleiter der GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH, Leimen; Tel: (06224) 97 13-58. Aufgabengebiet: Rohrleitungsstatik.

Dipl.-Ing. Basile Charalambus



Erlangen; Tel: (09131) 59985. Aufgabenbereich: Sonderprobleme auf dem Gebiet der Festigkeit von Rohrleitungsstatik und -dynamik.

Dr.-Ing. Andreas Schleyer



Geschäftsführer der GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH, Leimen; Tel: (06224) 97 13-18.

sten, wie Eigen- und Betriebsgewicht, Vorverschiebungen, Wärmeausdehnung, systembedingten Belastungen, äußere Belastungen usw. Die Auswirkungen dieser Einzelbelastungen werden entweder einzeln oder als Summe betrachtet und begrenzt. In den meisten Fällen erfolgt die Begrenzung durch Vergleich der in den Bauteilen verursachten Spannungen mit den dafür vorgesehenen zulässigen

Spannungen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Ermittlung der Schnittlasten in den einzelnen Querschnitten der Bauteile. Dazu muß man das gesamte System oder mindestens die Teile betrachten, die einen Einfluß auf die Schnittlasten haben. Diese Teile sind in den meisten Fällen festigkeitstechnisch statisch unbestimmte Konstruktionen. Die Ermittlung der Schnittlasten kann entweder durch vereinfachte Methoden, durch Erfahrung oder durch numerische Berechnungen erfolgen. Die genauesten Ergebnisse und damit die beste Ausnutzung der einzelnen Bauteile liefern heute die numerischen Berechnungsverfahren. Sie erfordern jedoch einen hohen Aufwand und geben keinerlei Hinweise zur Optimierung des Tragverhaltens der Systeme. Ferner kann die Berechnung erst nach der Fertigstellung der Planung der Systeme erfolgen. Falls das Ergebnis nicht zum Ziel führt, muß anschließend die Planung neu durchgeführt werden und durch eine erneute Berechnung überprüft werden. Die Anzahl dieser Iterationsschritte hängt von der Erfahrung des Planers und von der Größe und Komplexität des Systems ab. In bestimmten Teilen der Systeme haben außerdem die Randbedingungen, wie die Anschlußsteifigkeiten einen großen Einfluß auf die Ergebnisse der Berechnungen. Diese Einflüsse sind insbesondere bei der Berechnung von Rohrleitungssystemen von Bedeutung, da die Rohrbauteile nur als Biegeträger abgebildet und die Halterungs- und Komponentenanschlüsse durch die Angabe ihrer Steifigkeitswerte berücksichtigt werden.

Eine weitere Erschwernis stellen die Belastungen selbst dar. Sie führen hinsichtlich des Halterungs- und Aufhängungskonzeptes der Rohrleitung zum Teil zu gegenläufigen Anforderungen. Die Belastungen aus Eigen- und Betriebsgewicht zum Beispiel erfordern eine Aufhängung mit kürzeren Stützweiten, während die Belastungen aus Wärmedehnung der Rohrleitung und Verschiebungen der Anschlußpunkte durch eine möglichst „weiche“ Aufhängung, das heißt möglichst wenige Halterungspunkte, sowohl hinsichtlich der Beanspruchungen als auch der Anschlußlasten am besten abgetragen werden. Durch diese Ausführungen wird ersichtlich, daß die numerischen Berechnungsverfahren immer zum Ziel führen können, der Aufwand jedoch groß sein kann und sowohl von der Erfahrung des Planungs- als auch des Berechnungsingenieurs abhängig ist. Ferner liefern die numerischen Berechnungen keine systematischen Hinweise zur Optimierung anderer Systeme mit nicht vergleichbaren Abmessungen und Trassierungen.

Die Nachteile der numerischen Berechnungsnachweise für die Systeme von

verfahrenstechnischen und chemischen Anlagen können durch ein Verfahren beseitigt werden, das dem Planungsingenieur die Möglichkeit gibt, nach Festlegung der Trassierung und während der Planung, das Halterungskonzept des Systems so zu gestalten, daß sowohl die Beanspruchungen der Rohrbauteile als auch die Halterungs- und Komponentenanschlussslasten, abhängig von der Art der Belastungen, optimiert werden können. Dabei werden vom Planungsingenieur keine speziellen Festigkeitskenntnisse oder Kenntnisse der numerischen Berechnungsverfahren gefordert.

Beschreibung des Verfahrens

Damit der sichere Betrieb eines Systems gewährleistet werden kann, müssen für die Teile des Systems folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Beanspruchungen der Rohrbauteile einschließlich der Einbauten dürfen die von der Betriebsweise der Anlage und den gestellten Sicherheitsanforderungen abhängigen Grenzen nicht überschreiten.
- Die auf die Halterungskonstruktionen und ihren Gebäudeanbindungen vom Rohrleitungssystem ausgeübten Lasten müssen unter Einhaltung der jeweiligen zulässigen Grenzen abgetragen werden.
- Die vom Rohrleitungssystem auf die angeschlossenen Komponenten – wie Behälter, Wärmetauscher, Pumpen usw. – ausgeübten Lasten müssen unterhalb der vom Hersteller der jeweiligen Komponente angegebenen Grenzlast liegen.

Die Grundlage zur Erfüllung dieser Bedingungen bilden die sich aus den Belastungen ergebenden Schnittlasten und die zulässigen Werte. Während die jeweiligen zulässigen Werte entweder durch die zugrunde gelegten Codes, wie [1 – 3] usw. oder bei Verwendung von katalogisierten oder Normbauteilen durch die Normangaben schon vor der Planung bekannt sind, müssen die Belastungen ent-

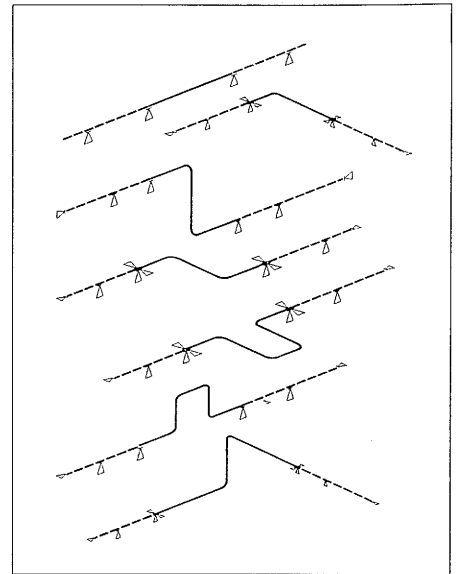


Bild 1: Wichtige Repräsentanten möglicher Rohrleitungskonfigurationen

Fig. 1: Important representative elements of possible pipeline configurations

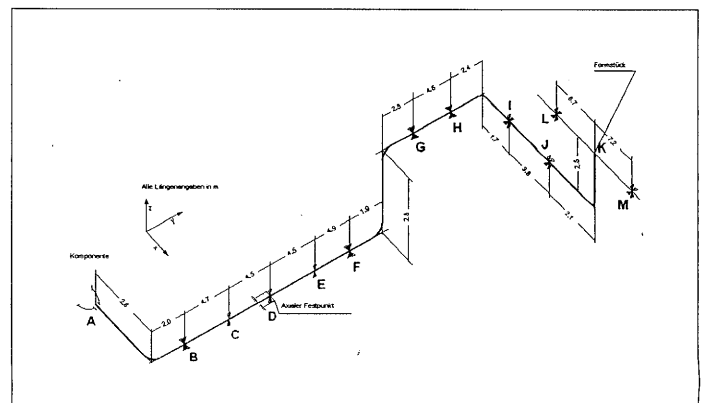
weder, wie oben erwähnt, durch eine numerische Berechnung oder durch das im folgenden beschriebene Verfahren ermittelt werden.

Die Rohrleitungen werden aus wenigen Bauteilen – wie gerade Rohre, Bögen, Biegungen, T-Stücke, Reduzierstücke – zusammengesetzt. Die sich dadurch ergebenden Rohrtrassierungen lassen sich in wenigen Konfigurationen zusammenfassen, die mit den erforderlichen Halterungen und Anschlüssen und unter Zugrundelegung von Erfahrungswerten durch mathematische Modelle beschrieben werden können.

Diese Modelle können entweder für bestimmte Halterungs- und Stützabständen die Schnittlasten liefern oder durch Variation einzelner oder mehrerer dieser Abstände zur Optimierung einzelner relevanter Größen, wie Schnitt- und Anschlußlasten oder Verformung des Sy-

Bild 2: Erläuterung der Vorgehensweise bei der Methode

Fig. 2: Explanatory notes for the method procedure



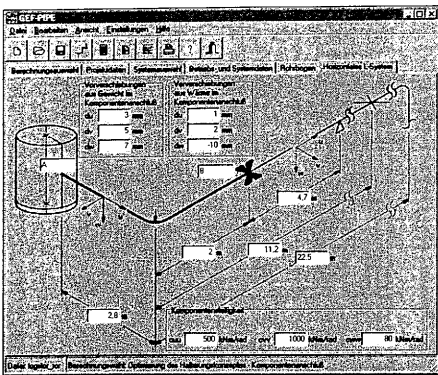


Bild 3: Grafisches Eingaberegisterblatt für „Einzelstruktur – Komponentenanschluß – Horizontales L-System“

Fig. 3: Graphical input register sheet for "Individual structure/Component connection/Horizontal L system"

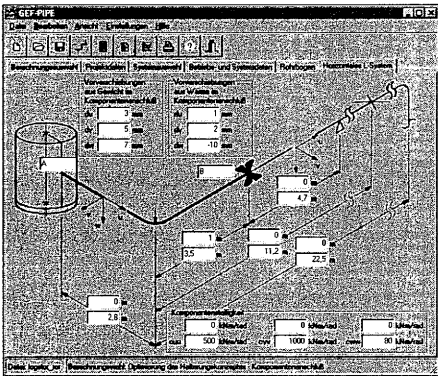


Bild 4: Grafisches Eingaberegisterblatt für „Parameter – Komponentenanschluß – Horizontales L-System“

Fig. 4: Graphical input register sheet for "Parameter/Component connection/Horizontal L system"

stems herangezogen werden. Zur mathematischen Beschreibung dieser Modelle werden nur die zu betrachtende Stützweite, die unmittelbar anschließenden Stützweiten und für Komponenten- und Rohranschlüsse entweder die Stutzensteifigkeiten oder die Abmessungen der Anschlüsse benötigt. Der weitere Verlauf der Rohrleitung wird durch die Angabe von Steifigkeitswerten so berücksichtigt, daß die Schnittlasten im betrachteten Teil des Systems gegenüber einer numerischen Berechnung des Gesamtsystems einen Fehler kleiner als etwa 10 % aufweisen. Diese Modelle werden so aufbereitet, daß sie neben den Schnittlasten auch die Halterungs- und die Komponentenanschlußlasten liefern.

Für die Rohrabschnitte nach den Komponentenanschlüssen können entweder die Stützweiten der Rohrleitung unter Einhaltung der zulässigen Komponenten-

schlußwerte optimiert werden, oder vom Komponentenhersteller Toleranzbreiten für die Stützweiten der ersten Rohrstützungen angegeben werden.

Die Modelle können direkt folgende Belastungen berücksichtigen:

- Eigen- und Betriebsgewicht der Rohrleitung und ihrer Einbauten,
- Belastungen aus der Wärmedehnung des Systems,
- Belastungen aus Vorverschiebungen der Komponenten- und Halterungsanschlüsse,
- ersatzstatische Belastungen aus dynamischen Belastungen infolge betrieblicher Vorgänge, wie Pumpenanfahren oder abfahren, Öffnen oder Schließen von Stellorganen sowie
- ersatzstatische Belastungen aus äußeren Ereignissen, wie Erdbeben.

Selbstverständlich werden im konkreten Fall nur die tatsächlich auftretenden Lasten berücksichtigt. Die mathematischen Modelle berücksichtigen, wie auch die meisten numerischen Berechnungen die Biegetheorie erster Ordnung, das heißt das Gleichgewicht wird für die ursprüngliche nicht verformte Struktur erstellt. Dabei wird das Verhalten der einzelnen Bauteile durch ihre in den Regelwerken, wie [1 – 3] angegebenen Steifigkeiten und Spannungskonzentrationsfaktoren erfaßt. Diese Werte sind in den Gleichungen der Modelle enthalten und werden aus den eingegebenen Abmessungen ermittelt. Ferner liefern die Modelle direkt die relevanten Anschlußlasten, so daß keine Umrechnung oder Korrektur, wie im allgemeinen bei numerischen Berechnungsverfahren erforderlich ist. Auf die Aufstellung der Modelle wird hier nicht näher eingegangen. Die Gleichungen für einige Modelle werden in [5] aufgeführt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß die Modelle neben der theoretischen Betrachtung auch wichtige Erkenntnisse aus der Praxis enthalten. So sind zum Beispiel die Art der Halterungen vor Komponenten, die Halterungen im Bereich abzweigender Rohrleitungen usw. in den Repräsentanten vorbestimmt.

Eine Auswahl der wichtigsten Konfigurationen, mit denen große Teile der Rohrleitungstrassierungen und Halterungskonzepte erfaßt werden können, zeigt das Bild 1. Die jeweils zu berechnende Hauptlänge ist dabei durchgezogen, Hilfslängen sind gestrichelt dargestellt.

Selbstverständlich kann mit entsprechendem Aufwand auch jede andere Rohrkonfiguration durch einen Repräsentanten beschrieben werden. Dabei ist jedoch der Einfluß der weiterführenden Leitungen entweder durch Erfahrungswerte oder durch entsprechende numerische Berechnungen über Steifigkeitsangaben zu erfassen.

Die mathematischen Modelle für die einzelnen Repräsentanten sind, wegen der vielen Parameter und Variablen in den Gleichungen, nur in Verbindung mit einem Rechner sinnvoll anwendbar. Da jedoch heute die Planung der Systeme in den meisten Fällen rechnerunterstützt erfolgt, können diese Repräsentanten von Rohrsystemen als Bestandteil der Planung integriert und während der Planung benutzt werden. Der Rechenaufwand ist so gering, daß die Ergebnisse während der Planung eines Halterungskonzeptes unmittelbar vorliegen und Variationen zur Optimierung vorgenommen werden können.

Vorgehensweise bei der Anwendung

Die Anwendung der Methode der Repräsentanten gestaltet sich denkbar einfach. Man kann von einem beliebigen Endpunkt des zu betrachtenden Systemabschnittes ausgehen und das System abschnittsweise betrachten. Bild 2 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise. Man betrachtet die Abschnitte wie folgt:

- **Abschnitt A – B:** Erforderliche Größen: die Hauptlänge A – B, die Hilfslänge B – C, die Steifigkeiten der Komponente;
- **Abschnitt B – C:** Erforderliche Größen: die Hauptlänge B – C, die Hilfslängen A – B und C – D usw.;
- **Abschnitt J – K:** Erforderliche Größen: die Hauptlänge J – K, die Hilfslängen I – J, K – L, und K – M sowie die Abmessungen des Formstücks.

Für jeden Abschnitt werden die relevanten Größen, wie Rohrspannungen, Halterungslasten, Komponentenanschlußlasten oder Durchbiegungen mit den jeweiligen Grenzwerten verglichen und Aussagen über die zulässigen Bereiche gemacht. Die Grenzwerte für die Rohrspannungen werden dem jeweils gültigen Regelwerk entnommen und sind als Werte vorzugeben. Die Halterungslasten werden entweder auf die firmenüblichen Katalogwerte begrenzt oder dienen bei Sonderkonstruktionen von Halterungen als Dimensionierungslasten. Die Komponentenanschlußlasten werden auf die Vorgaben der Komponentenhersteller begrenzt. Die Durchbiegungen des Rohrabschnittes können bei bestimmten Systemen maßgebend für die Dimensionierung sein.

Die Grenzwerte dafür sind anlagenspezifisch festzulegen und können, mit Ausnahme des Kriteriums zur Entleerung des Systems, nicht allgemein formuliert werden. Diese anlagenspezifischen Kriterien können jedoch vorgegeben werden.

Die erläuterte Vorgehensweise kann sowohl beim Nachweis eines vorhandenen Systems als auch bei der Optimierung beibehalten werden. Es empfiehlt sich bei verzweigten Rohrsystemen erst

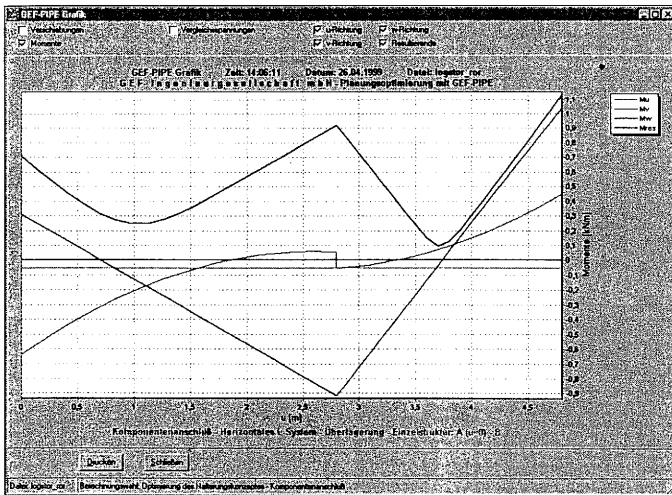


Bild 5: Momentenverläufe M_U , M_V , M_W für „Einzelstruktur – Komponentenanschluß –Horizontales L-System“

Fig. 5: Plots of moments M_U , M_V , M_W for "Individual structure/Component connection/Horizontal L system"

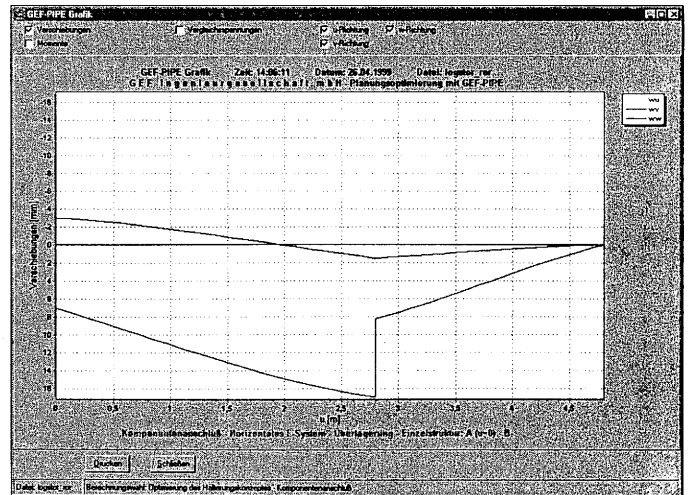


Bild 6: Verschiebungen w_U , w_V , w_W für „Einzelstruktur – Komponentenanschluß – Horizontales L-System“

Fig. 6: Displacements w_U , w_V , w_W for "Individual structure/Component connection/Horizontal L system"

die Hauptleitungen zu betrachten und anschließend die abzweigenden Teilsysteme. Dadurch können die Verschiebungen der Hauptleitung als Vorgabe für die abzweigenden Systeme direkt berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit bietet die Methode bei der Festlegung der Anschlußlasten an Komponenten. Teile der Methode können von den Komponentenherstellern zur Angabe von zulässigen Stützweiten und Stützkonzepten der ersten zwei Stützweiten der Rohrleitung nach der Komponente benutzt werden. Dabei können die in Bild 2 aufgeführten Stützweiten

A – B und B – C als Maximal- und Mindestlängen sowie die Halterungslasten für den Halterungspunkt B als Maximalwert festgelegt werden. Die Festlegung der zulässigen Stützweiten nach dem Komponentenanschluß setzt die Kenntnis der Stützensteifigkeiten voraus. Diese können für Behälter und Wärmetauscher zum Beispiel nach [6] oder [7] bestimmt werden. Für Pumpen und andere empfindlichen Komponenten sind die von den Herstellern angegebenen Werte zugrunde zu legen. Damit werden für die zu betrachtende Rohrleitung nach der Komponente die Schnitt- und Anschlußlasten

ermittelt. Um die zulässigen Stützweitenbereiche zu definieren sind die belastungsabhängigen zulässigen Schnittlasten der Komponente notwendig. Diese sind in der Regel die Biegemomente M_{xx} , M_{yy} , und M_{zz} sowie die Axialkraft F_{ax} . Liegt die Auslegungs- bzw. die Betriebstemperatur im Bereich der Raumtemperatur, so genügt die Berücksichtigung der Belastungen aus Eigen- und Betriebsgewicht. In diesem Fall sind die Ergebnisse der Betrachtung die maximalen Stützweiten vor dem Komponentenanschluß. Wird das System bei Temperaturen, die oberhalb oder wesentlich unterhalb der

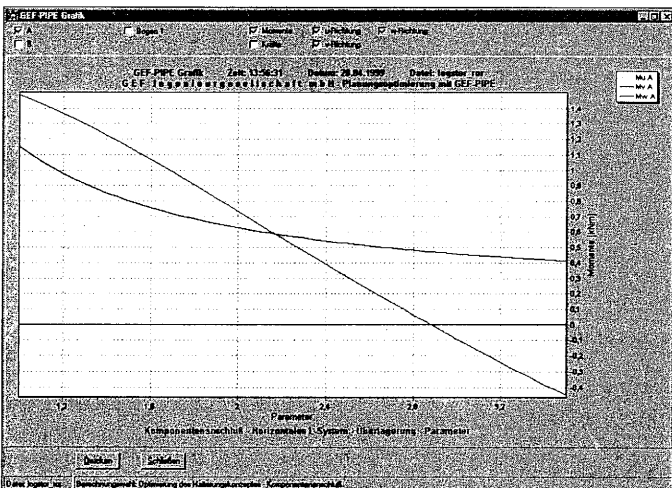


Bild 7: Momentenverläufe M_U , M_V , M_W im Komponentenanschluß in Abhängigkeit vom Parameter für „Einzelstruktur – Komponentenanschluß – Horizontales L-System“

Fig. 7: Plots of moments M_U , M_V , M_W in the component connection as a function of the parameter for "Individual structure/Component connection/Horizontal L system"

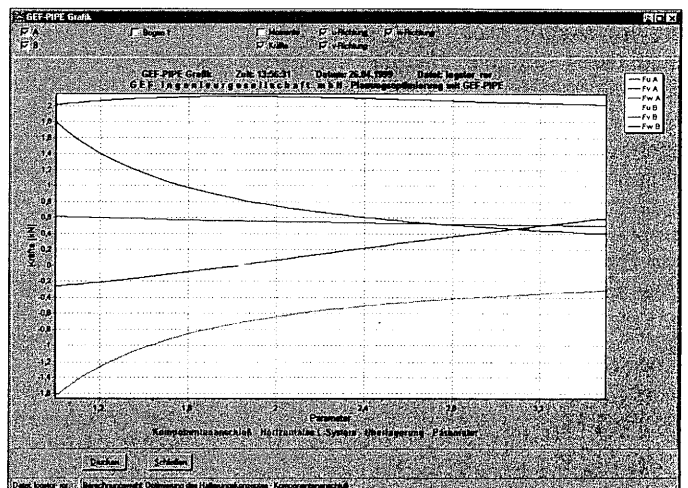


Bild 8: Komponentenanschluß- und Halterungslastverläufe in Abhängigkeit vom Parameter für „Einzelstruktur – Komponentenanschluß – Horizontales L-System“

Fig. 8: Plots of component connection and mounting loads as a function of the parameter for "Individual structure/Component connection/Horizontal L system"

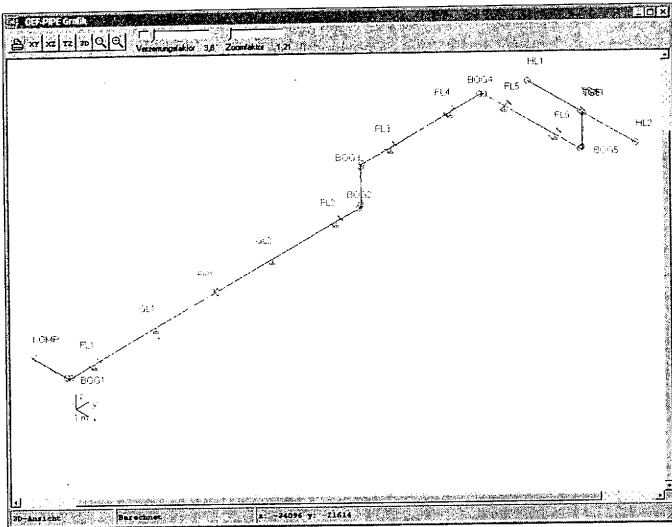


Bild 9: Gesamtsystemgrafik

Fig. 9: Graphic of the overall system

Raumtemperaturen liegen, betrieben, so ist neben der Berücksichtigung der Gewichtsbelastungen auch die Bestimmung der zulässigen Stützweiten für die Temperaturdifferenz zwischen Betriebs- und Raumtemperatur notwendig. Da die Komponentenanschlußlasten aus Wärmedehnungs- und Vorverschiebungslasten mit zunehmender Stützweite abnehmen, liefert diese Belastung minimal zulässige Stützweiten. Betrachtet man die Belastungen als Funktion der ersten Stützweite, so lautet die Angabe:

$$L_{1min} < L_{1ist} < L_{1max}$$

Selbstverständlich werden bei der Festlegung der zulässigen Werte auch die Beanspruchungen der Rohrbauteile und der darin befindlichen Armaturen oder sonstiger Bauteile berücksichtigt.

Ist die Rohrleitungstrassierung zu diesem Zeitpunkt bekannt, so genügt die Betrachtung dieser Trassierung. Wenn die Trassierung nicht bekannt ist, kann man diese Angaben für die möglichen Rohrleitungsführungen machen.

Ein weiterer Vorteil der Methode ist die schnelle Ermittlung der Schnittlastenverläufe innerhalb eines oder mehrerer Abschnitte. Dadurch kann man den Einbau empfindlicher Rohrleitungseinbauten, wie Stellorgane, in Bereichen niedrigen Beanspruchungsniveaus vorsehen.

Realisierung des Berechnungsverfahrens in der Statik Software GEF-PIPE

Die beschriebene Berechnungsmethode ist als eines von vier Modulen im Programmsystem GEF-PIPE realisiert und ermöglicht die Optimierung von Halterungskonzepten von Rohrleitungssystemen während der Planungsphase.

Der Anwender berechnet in GEF-PIPE vorbereitete Systemteile (Bild 3), mit denen nahezu alle Rohrleitungsführungen freiverlegter Systeme abgebildet werden können. Die dreidimensionale Richtung der Schnittgrößen wird durch die Verwendung eines lokalen Koordinatensystems (u – axial positiv in Berechnungsrichtung, v – horizontal nach rechts, w – vertikal nach unten, siehe Bild 3) einfach gehandhabt. Zur sicheren Auslegung der Anlage werden folgende Größen ermittelt, die auch nach jedem vorkommenden Parameter (Bild 4) optimiert werden können:

- Verschiebungen,
- Momente,
- Vergleichsspannungen und Zulässige Spannungen,
- Halterungslasten,
- Komponentenanschlußlasten,
- Bogenbelastungen,
- Halterungslasten in Abhängigkeit vom Optimierungsparameter.

Die Kurven der Schnittgrößen und Optimierungsergebnisse können zudem grafisch dargestellt werden (Bild 5 bis 9), um damit schnell und einfach den Wert des Optimums ermitteln zu können.

Die GEF-PIPE-Modelle berücksichtigen direkt folgende Belastungen:

- Eigen- und Betriebsgewicht des Systems,
- Belastungen aus Wärmedehnung,
- Belastungen aus Vorverschiebungen der Komponenten- und Halterungsanschlüsse,
- ersatzstatische Belastungen aus dynamischen Belastungen infolge betrieblicher Vorgänge,
- ersatzstatische Belastungen aus äußeren Ereignissen, wie zum Beispiel Erdbeben.

Der Spannungsnachweis kann wahlweise geführt werden nach ANSI, FDBR, ASME, TRD, KTA oder Europa-Norm.

Zusammenfassung

Vorgehensweise bei der Rohrsystemauslegung:

- a) Ermittlung der Schnitt- und Anschlußlasten anhand von vorgegebener, vorab optimierter, Rohr-Systemkonfigurationen (Repräsentanten).
- b) Bestimmung und Vorgabe von zulässigen Stützweiten unter Berücksichtigung der zulässigen Rohrleitungsbeanspruchungen, Halterungslasten, und Komponentenanschlußlasten.

Vorteile der neu entwickelten Berechnungsmethode:

- Keine Berechnung des Gesamtsystems und dadurch Vermeidung von Iterationsschritten,
- Möglichkeit der Optimierung der Systeme durch Parametervariationen schon in der Planungsphase,
- Begrenzung der Anschlußlasten auf zulässige Werte von firmeneigenen oder allgemeinen Katalogen,
- zeitliche Entkopplung der Ermittlung und Bewertung der Schnittlasten in den Verbindungen zwischen Rohrleitungen und Komponenten,
- rechtzeitige Bestimmung der Anschlußlasten zur Dimensionierung der Halterungskonstruktionen.

Durch die Aneinanderreihung der zuvor beschriebenen Einzelsysteme (Repräsentanten) wird somit das Gesamtsystem (Bild 9) abgebildet.

Literatur

- [1] TRD Richtlinien TRD 300 Festigkeitsberechnung von Dampfkesseln
- [2] American Society of Mechanical Engineers ASME Code B31.1 "Power Piping", Edition 1989
- [3] Fachverband Dampfkessel- Behälter- und Rohrleitungsbau, FDBR Handbuch Festigkeitsberechnung
- [4] Charalambus, B.: Verfahren zur Rohrleitungsplanung und Verlegung mit implizitem Berechnungsnachweis. Zeitschrift Chemie-Technik, 19. Jahrgang (1990) Nr. 3
- [5] Charalambus, B.: Ein Verfahren zur optimalen Planung von Rohrleitungssystemen und zur Überprüfung der Belastungen von ausgeführten Systemen. Zeitschrift 3R internat. (1994) Nr. 4-5
- [6] British Standard 5500. Appendix G Stresses from local loads, thermal gradients etc; Recommended methods of Calculation
- [7] Mershon, J.L.; Mokhtarian, G.; Ranjan, V.; Rodabaugh, E. C.: Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles. Welding Research Council Bulletin 297 New York Aug. 1987. Welding Research Council New York Aug. 1987

Weitere Informationen über Kennziffer G259