

Verformungs- und Spannungsanalyse eines Zylinderkopfes mittels FEM

Harald Berger, Walter Weese, Felix Frost, Ingo Menze

1. Einleitung

Zylinderköpfe von Viertakt Dieselmotoren sind in ihrer konstruktiven Gestaltung die kompliziertesten Motorhauptbauteile. Ihre Aufgabe als brennraumbildendes Bauteil mit Aufnahme der den Ladungswechsel des Brennraumes realisierenden Baugruppen – Ventile, Ventilsitzringe, Ventilkanaäle – der Einspritzdüse und des Auslaßventiles mit Auslaßventilkanal sowie ihre Funktion im Verspannungsverband Zylinderkopf – Zylinderlaufbuchse und -block bedingen darüber hinaus komplizierte Randbedingungen für die thermische und mechanische Belastung dieses Bauteiles. Durch neue konstruktive Lösungen für die anderen brennraumbildenden Bauteile (Zylinderlaufbuchse und Kolben) wird bei Leistungssteigerungen die Höhe der erreichbaren Leistungskonzentration vor allem durch die thermische und mechanische Belastbarkeit des Zylinderkopfes begrenzt. Die komplexe Analyse des Verformungs- und Beanspruchungsverhaltens des Zylinderkopfes ist daher eine Schwerpunktaufgabe der Erzeugnissentwicklung und weiteren Leistungssteigerung von Dieselmotoren. Zielstellung der vorliegenden Ausführungen ist es, Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von FE-Berechnungen bei der Verformungs- und Beanspruchungsanalyse unter dem Blickpunkt des notwendigen Kompliziertheitsgrades des verwendeten Modells und des FE-Programmes darzulegen.

Dabei wurden die Modelle, die Randbedingungen und damit die Gesamtergebnisse der Verformungs- und Beanspruchungsanalysen wesentlich beeinflussenden thermischen Randbedingungen als aus Motormessungen bzw. getrennten Untersuchungen her bekannt vorausgesetzt.

2. Modellstufen für den Zylinderkopf

Die durchgeführten Untersuchungen am Zylinderkopf stellen einen Komplex von Analysen dar, die sowohl der Erfassung des Gesamtverhaltens des Kopfes als auch zur Gewinnung von Aussagen über Detailbereiche dienen. Dabei wurde der Einfluß einzelner Lastanteile auf den Beanspruchungszustand untersucht, und es wurden das Verhalten unter Betriebsbedingungen, d. h. bei Überlagerung verschiedener Lastanteile, betrachtet.

Der Zylinderkopf unterliegt während seines Einsatzes verschiedenen Belastungsphasen, die zu sehr unterschiedlichen Verformungs- und Spannungszuständen führen. Dabei treten im wesentlichen drei Lastanteile in Erscheinung:

- statisch infolge Verspannung im Verband mit Zylinderlaufbuchse und -block
- dynamisch infolge Zünddruck
- Wärmebelastung (instationär und stationär)

Während der Betriebsphase des Motors wird das entstehende Temperaturfeld als stationär betrachtet. In der Anfahr- und Abfahrphase müssen dagegen auch instationäre Prozesse berücksichtigt werden.

Auf Grund der Kompliziertheit der Geometrie des Zylinderkopfes – Bild 1 zeigt eine Prinzipskizze – und der Komplexität des Belastungsmechanismus ist eine Erfassung der realen Beanspruchungszustände außerordentlich schwierig. Die Untersuchungen erfolgen deshalb in

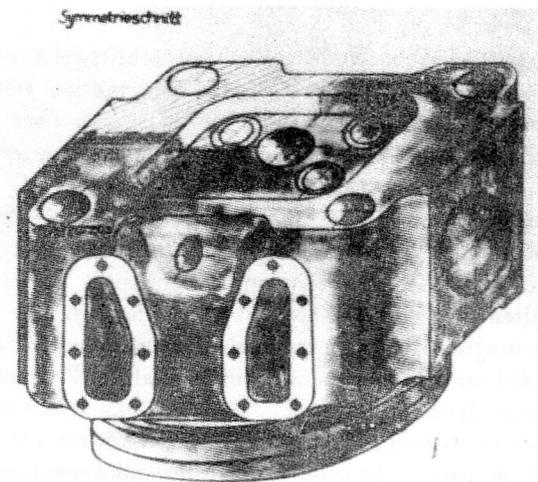


Bild 1
Prinzipische Skizze eines Zylinderkopfes

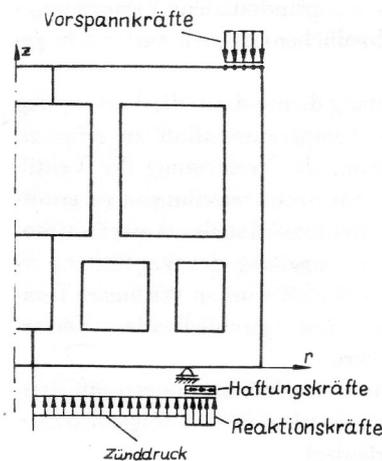


Bild 2
Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell

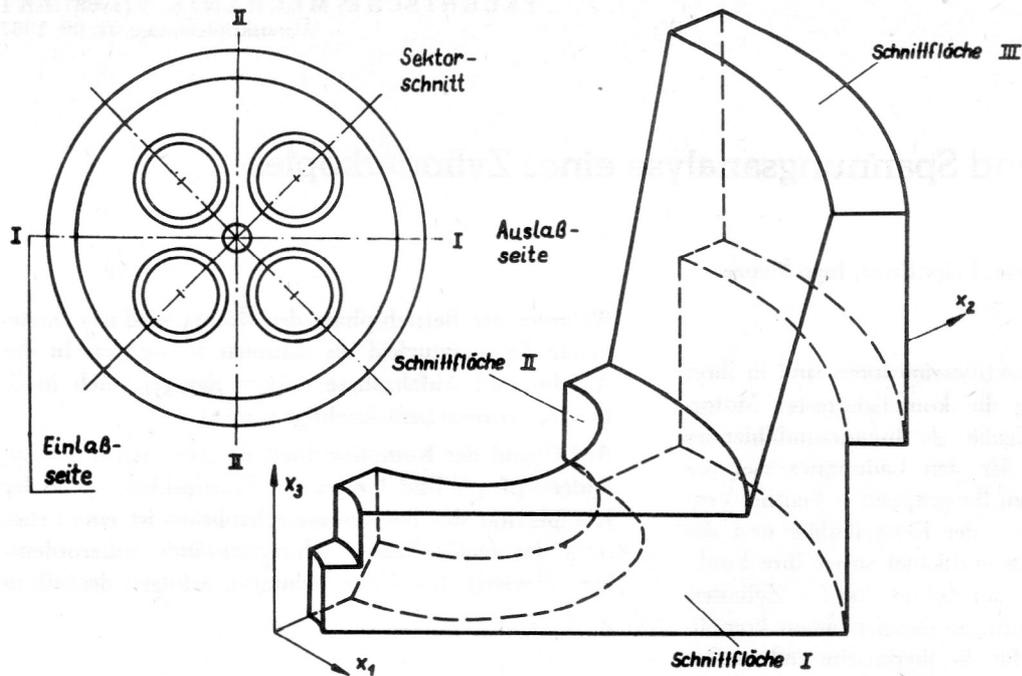


Bild 3
3D-Ventilausschnittmodell

unterschiedlichen Modellstufen mit schrittweise reduziertem Idealisierungsgrad. Außerdem wurden Detailuntersuchungen eingebunden, um Aussagen über das Verhalten ausgewählter Zylinderkopfbereiche zu erhalten.

Im folgenden wird ein Überblick über die verwendeten Modelle und die damit verbundenen Zielstellungen gegeben. Die Abschnitte 3. und 4. enthalten zu ausgewählten Modellen ausführliche Darstellungen. Alle Berechnungen erfolgten mit dem Programmsystem COSAR. Hierbei wird besonders die Universalität des Programmsystems deutlich, da sowohl die Behandlung unterschiedlicher mechanischer Modelle (Rotationskörper, 3D-Modell) als auch unterschiedliche Aufgabenklassen (stationäre und instationäre Temperaturfeldberechnung, Spannungs- und Verformungsberechnung) erforderlich waren. Um Vorstellungen über das Steifigkeitsverhalten des Zylinderkopfes zu gewinnen, wurde zunächst ein rotations-symmetrisches Modell entwickelt (Bild 2). Durch Berücksichtigung der wesentlichen Versteifungselemente konnten Aussagen über das grundsätzliche Verformungsverhalten bei unterschiedlichen Betriebszuständen gewonnen werden.

Eine nächste Untersuchung diente dazu, die Verformung des Ventilsitzes unter Temperatureinfluß zu erfassen. Vor allem ging es darum, die Verformung des Ventilsitzes bei bestimmten Temperaturverteilungen zu ermitteln. Dazu wurde ein dreidimensionales Ausschnittmodell entwickelt, das die Umgebung des Ventilsitzes erfaßt (Bild 3). Für dieses Modell wurden stationäre Temperaturfeldberechnungen mit anschließender Verformungsanalyse durchgeführt.

Die weiteren vorgenommenen Untersuchungen mit dreidimensionalen Modellen werden in den folgenden Abschnitten ausführlich erläutert.

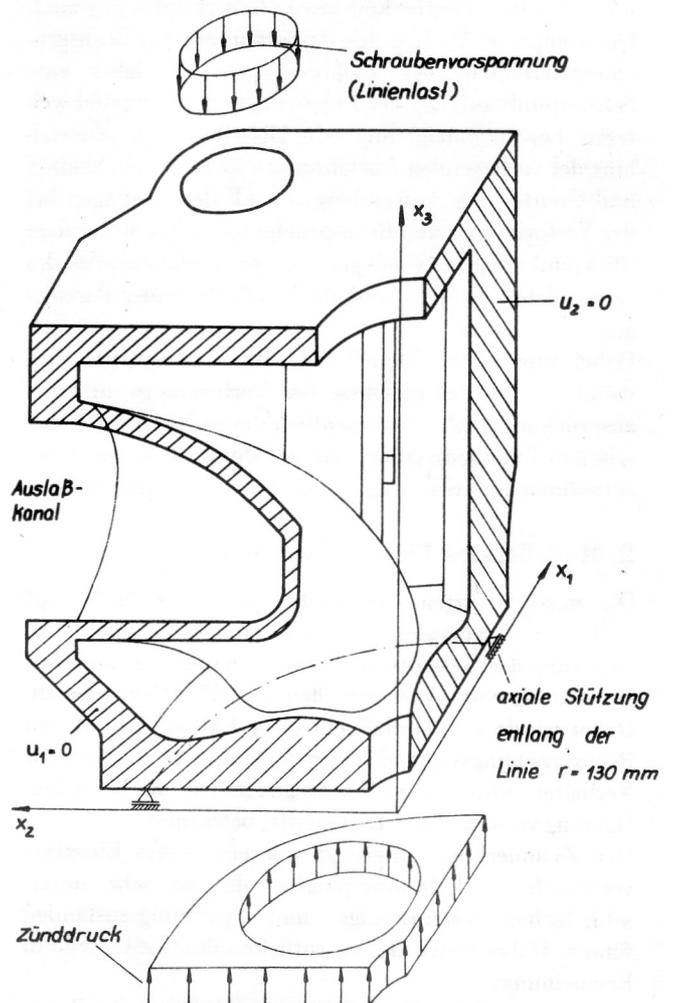
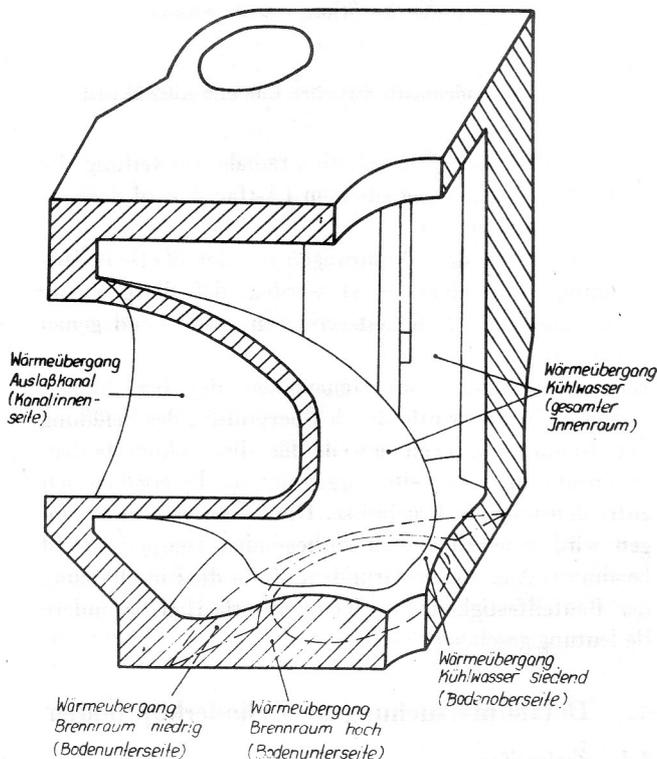


Bild 4
Berechnungsmodell Zylinderkopf - 3D

3. Zylinderkopf – 3D

3.1. Mechanisches Modell

Quantitativ verwertbare Ergebnisse für Verschiebungen und Spannungen am Zylinderkopf sind nur durch ein dreidimensionales Berechnungsmodell zu erhalten. Verschiedene Überlegungen zur Symmetrie der Konstruktion und der vorliegenden Belastungen führten jedoch zu der Überzeugung, daß die 3D-Vernetzung eines Viertels des Zylinderkopfes bereits aufschlußreiche Ergebnisse zu liefern in der Lage ist. Im Bild 4 ist das Berechnungsmodell mit geometrischen und statischen Randbedingungen dargestellt. Während die Randbedingungen für den Schnitt $x_1=0$ real sind, gelten die für $x_2=0$ angenommenen Symmetriebedingungen nur näherungsweise. Die Geometrie des Auslaßkanals wird weitgehend den wirklichen Bedingungen entsprechend erfaßt. Bei der Bodenplatte wurde zunächst eine gleichmäßige Dicke (gestrichelt im Bild 4 eingezeichnet) und beim verbesserten Modell der Einfluß der Dickenänderung berücksichtigt. Der Steifigkeitseinfluß der Ventilkonone wurde in Form einer massiven Stütze modelliert. Die durchgehende Versteifung der Zylinderwand im Symmetrieschnitt zwischen Ein- und Auslaßkanal ($x_2=0$) wurde berücksichtigt. Ebenfalls erfaßt wurde die Schwächung der Zylinderwand durch die Kernöffnungen und die reale Geometrie der Schraubenkanone. Somit wurden durch das vorliegende doppelsymmetrische Zylinderkopffmodell (vgl. Bild 4) die Geometrie, die Lagerung und die Belastung weitgehend den realen Bedingungen angepaßt.



Alle Außen- und Schnittflächen sind adiabaf.

Bild 5
Berechnungsmodell mit thermischen Randbedingungen

3.2. Belastungsmechanismus

Der Zylinderkopf ist einer komplizierten Belastung ausgesetzt. Besonders hohe Beanspruchungen treten an der Brennraumseite des Auslaßkanales auf. Diesem Bereich wurde bei einem verbesserten FE-Modell besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Speziell sind die Grundlastfälle Schraubenvorspannung (1), Zünddruck (2) und Temperaturfeld (3) sowie die Überlagerungslastfälle Vorspannung + Zünddruck (4) und Vorspannung + Zünddruck + Temperaturfeld (5) vorhanden (Bilder 4 und 5). Die Belastung durch Schraubenvorspannung wurde in Form einer gleichmäßigen Ringlast an der Schraubenkanone angesetzt. Die Zünddruckbelastung wurde als gleichmäßig verteilte Flächenlast an der Bodenunterseite angebracht. Bei der Temperaturbelastung kam es besonders auf die real angesetzten thermischen Randbedingungen an.

3.3. Vernetzung

Die im Programmsystem COSAR gegebene Möglichkeit der Substruktur/Superelementtechnik gestattet eine übersichtliche Erfassung der notwendigen topologischen und geometrischen Daten. Dabei wurde besonders bei der topologischen Datenerfassung die Standardstrukturierung vorteilhaft genutzt. Bild 6 zeigt eine Gesamtdarstellung der Vernetzung des Zylinderkopfviertels in 9 Substrukturen. Insgesamt wurden 139 3D-Elemente verwendet, was einer Gesamtknotenzahl von 1009 und einer Zahl von 3027 Freiheitsgraden entspricht. Hauptsächlich wurden HK60-Elemente eingesetzt. Aber auch andere Elementtypen des Elementkataloges kamen zur Anwendung, damit unzulässig große Verzerrungen der HK60-Elemente vermieden werden konnten. Zur realeren Erfassung der Bodenplatte wurde in diesem Bereich ein feineres Netz realisiert. Dem Bild 7 ist die

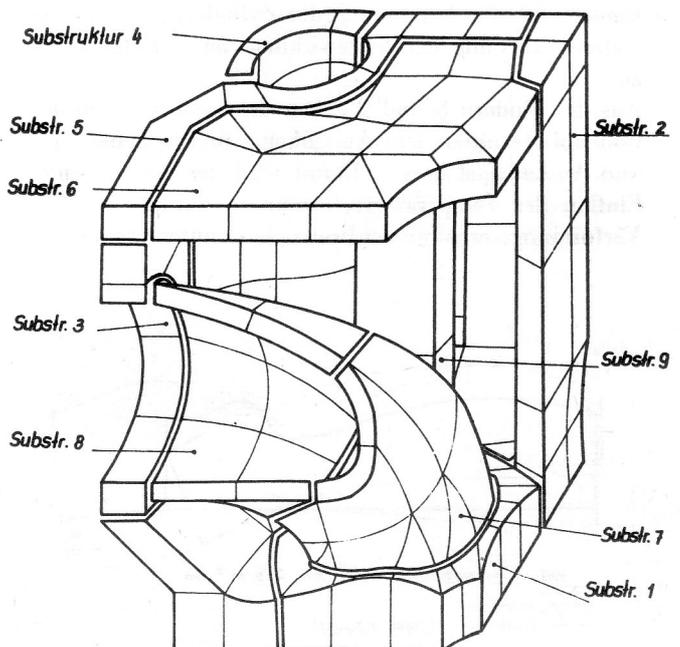


Bild 6
Vernetzung des Zylinderkopfviertels

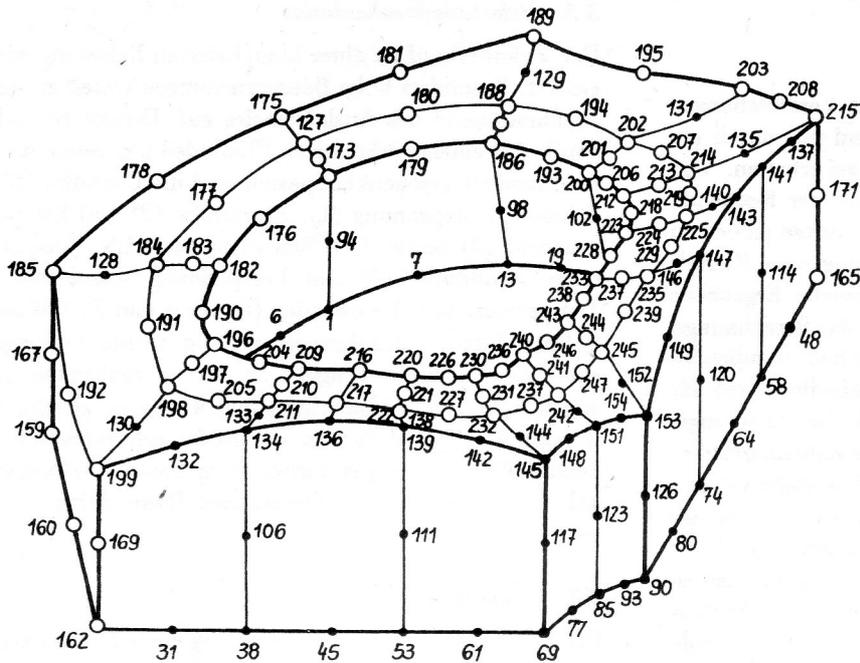


Bild 7
Vernetzung der Substruktur I

Elementaufteilung mit Knotennumerierung der Substruktur I zu entnehmen.

Trotz der relativ großen Elementzahl ist die Vernetzung in einigen Teilbereichen des Zylinderkopfes noch verbesserungswürdig. Im Abschnitt 4 dieses Beitrages wird mit der Behandlung eines Zylinderkopfbodenausschnittes darauf eingegangen.

3.4. Ergebnisse

Für alle berechneten Lastfälle ergaben sich kleinere Verschiebungswerte des 3D-Modells gegenüber einem rotationsymmetrischen Berechnungsmodell. Das ist u. a. darauf zurückzuführen, daß durch bestimmte Bauteilelemente, die erst beim 3D-Modell berücksichtigt werden konnten, die Steifigkeit vergrößert wird. Das trifft besonders für die Versteifung der Zylinderwand und die realere Erfassung der Stützwirkung der Ventilkannonen zu.

Aus den Bildern 8 und 9 gehen die Verformungen der Bodenplatte unter dem Auslaßkanal und zwischen Ein- und Auslaßkanal hervor. Damit wird der überwiegende Einfluß der Temperaturverformungen auf das gesamte Verformungsverhalten der Bodenplatte unterstrichen.

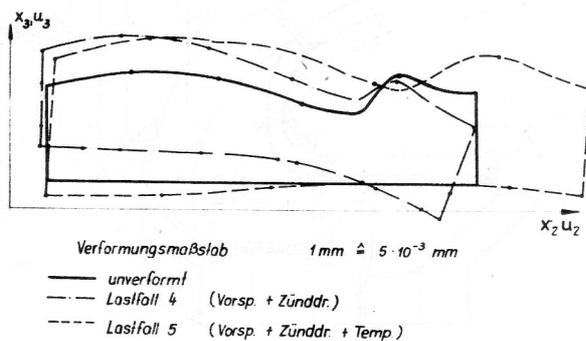


Bild 8
Verformung der Bodenplatte unter dem Auslaßkanal

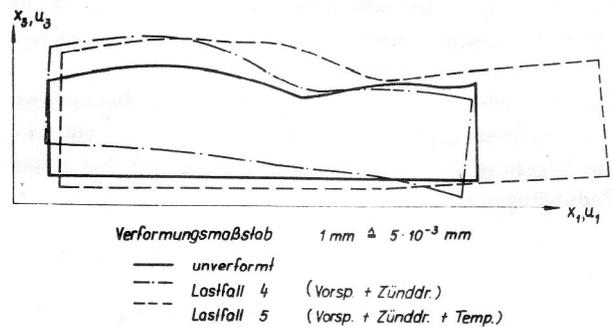


Bild 9
Verformung der Bodenplatte zwischen Ein- und Auslaßkanal

Im wesentlichen ergibt sich eine radiale Aufweitung, die vertikale Verschiebung aus dem Lastfall 4 wird dagegen teilweise kompensiert.

Ausgehend von den Erfahrungen bei der 3D-Bauteilberechnung kann eingeschätzt werden, daß die gewählte Vernetzung das Steifigkeitsverhalten ausreichend genau widerspiegelt.

Eine Einschätzung der Genauigkeit der berechneten Spannungswerte wurde durch Überprüfung der Erfüllung der Randbedingungen jeweils für die Zylinderbodenunterseite und -oberseite vorgenommen. Es ergaben sich zufriedenstellende Ergebnisse. Die Größe der Spannungen wird wesentlich vom vorliegenden Temperaturfeld bestimmt. Aus diesem Grunde muß für die Einschätzung der Bauteilfestigkeit dem Temperaturlastfall besondere Bedeutung geschenkt werden.

4. Detailuntersuchung am Zylinderkopfboden

4.1. Zielstellung

Der Zylinderkopfboden stellt die am meisten beanspruchte Partie dar. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Temperatureinfluß. Die unterschiedlichen Einflußzonen, Brennraum an der Bodenunterseite, Kühlwasser

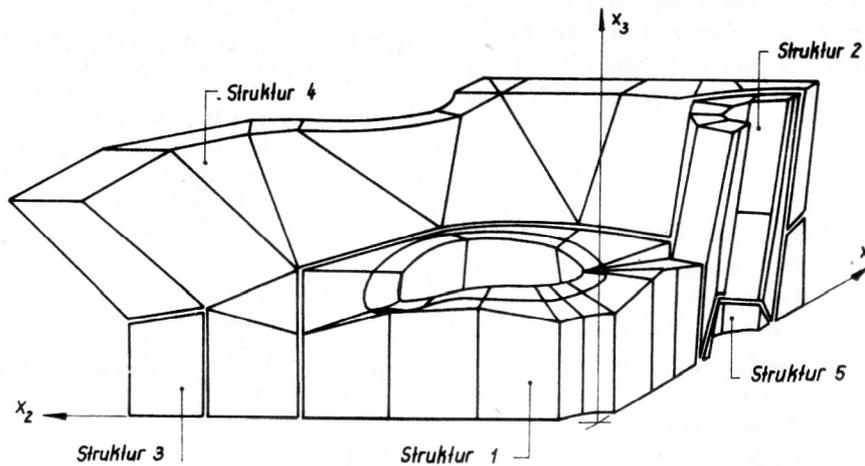


Bild 10
Vernetzungsmodell des Zylinderkopfbodens mit Struktureinteilung

an der Bodenoberseite und Öffnungen zu den Gaskanälen führen zur Ausbildung eines komplizierten Temperaturfeldes. Bezieht man An- und Abfahrvorgänge mit ein, so ist eine instationäre Temperaturfeldanalyse erforderlich. Um zu einer genaueren Aussage über die Temperaturvorgänge in diesem Bereich zu gelangen, wurde ein räumliches Ausschnittmodell entwickelt, das ein Viertel des Bodenbereiches des Zylinderkopfes wiedergibt (vergl. Bild 10). Die Untersuchungen mit diesem Modell erfolgten unter zwei Zielstellungen:

- a) Ermittlung von Wärmeübergangsbedingungen, die die Wiedergabe eines realitätsnahen stationären Temperaturfeldes sichern.
- b) Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturänderung während des Anfahrvorganges.

Da an bestimmten Punkten Temperaturmesswerte zur Verfügung standen, waren die Wärmeübergangsbedingungen solange zu modifizieren, bis der genaue Zustand durch die Rechnung wiedergegeben wurde.

4.2. Vernetzungsmodell

Mit dem gewählten dreidimensionalen Ausschnittmodell wird der zu untersuchende Bodenbereich des Zylinderkopfes realitätsnah wiedergegeben.

Wesentliche Elemente dabei sind die Erfassung der unterschiedlichen Bodendicke, der Gaskanalöffnung und des Anlaßkanals (Bild 10). Um den Abklingbereich für die im Boden auftretenden Vorgänge zu berücksichtigen, wurde der Wandansatz in das Modell einbezogen.

Der Bodenbereich wurde in 5 Substrukturen unterteilt (Bild 10), wobei die Strukturen 1, 2 und 3 eine Standardtopologie entsprechend dem Standardstrukturkatalog aufweisen. Insgesamt besteht das Vernetzungsmodell aus 73 Elementen und 583 Knoten.

4.3. Wärmerandbedingungen

Der Bodenbereich wird von verschiedenen Zonen umgeben, denen unterschiedliche Wärmeübergänge zugeordnet sind. Folgende Zonen lassen sich unterscheiden:

- Brennraum
- Kühlwasser
- Gaskanal
- Luft

Während die letzten 3 Zonen mit jeweils konstanter Mediumtemperatur und Wärmeübergangszahl erfaßt werden können, treten an der Brennraumseite örtlich stark differierende Wärmeübergangsverhältnisse auf. Aus diesem Grund wurden hier knotenpunktweise veränderliche Wärmeübergangszahlen und als konstante Umgebungstemperatur die aus geschlossenen Motorarbeitsprozeßberechnungen erhaltene mittlere resultierende Gastemperatur verwendet.

In mehreren stationären Rechnungen wurden die Wärmeübergangszahlen an der Brennraumseite variiert zur Anpassung der brennraumseitigen Wandtemperaturen an meßtechnisch abgesicherte Stütztemperaturen.

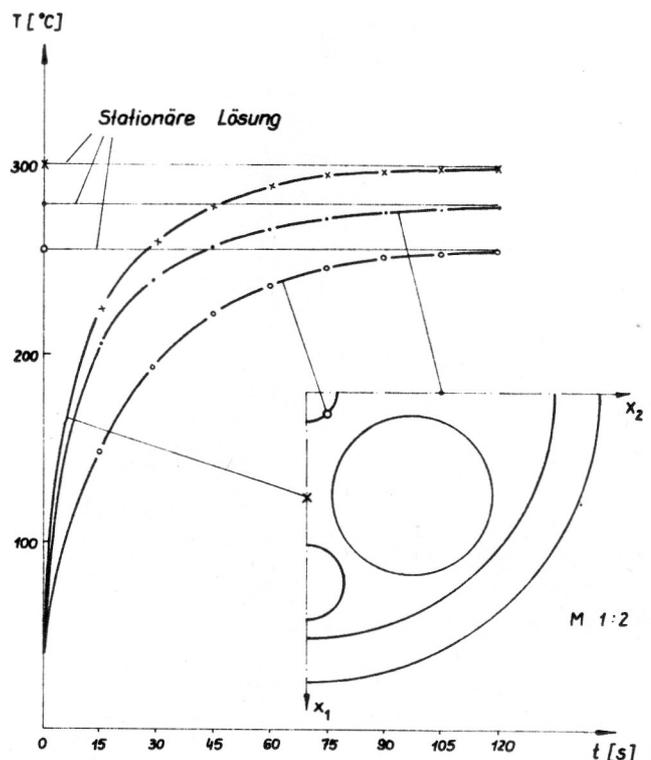


Bild 11
Temperaturänderung während des Aufheizvorganges für ausgewählte Punkte an der Bodenunterseite

Als Anfangszustand wurde die Temperatur des gleichmäßig vorgewärmten Motors angesetzt und die Endbedingung wurde durch die zum stationären Belastungszustand gehörenden rechnerisch angepaßten Randbedingungen fixiert.

4.4. Ergebnisse

Durch Variation der Wärmerandbedingungen im Brennraumbereich mit der Zielstellung, genauere Temperaturwerte an ausgewählten Punkten zu erreichen, konnten Aussagen über eine realitätsnahe Temperaturverteilung im zu untersuchenden Bodenbereich gewonnen werden.

Weiterhin lieferte die instationäre Temperaturfeldberechnung eine gute Übereinstimmung mit Meßwerten zu verschiedenen Zeitpunkten, insbesondere dem Zeitpunkt des Erreichens des stationären Zustandes. Bild 11 zeigt für ausgewählte Knotenpunkte den zeitlichen Temperaturverlauf.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die stationäre und instationäre Temperaturverteilung im Bodenbereich des Zylinderkopfes bilden die Grundlage für weitere Festigkeitsanalysen.

LITERATUR

- [1] Gabbert, U.; Berger, H.; Zehn, M.; Fels, D.: Universelles Programmsystem COSAR – Übersicht über den nachnutzbaren Leistungsumfang. Maschinenbautechnik, 34 (1985), H. 8, 352 – 356.
- [2] COSAR-Nutzerhandbuch: Teil I – Grundlagen, Teil II – Eingabevorschrift. TH Magdeburg, WB Festkörpermechanik, Methodisch-Diagnostisches Zentrum „Finite Elemente“, 1985.