7.4 Ein Anwendungsbeispiel der Formoptimierung in der Reifenkonstruktion

7.4.1 Problemstellung

Die Konstruktion von Reifen sowie deren numerische Analyse z.B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode erfordert ein hohes Maß an mechanischem Verständnis der vielfältig auftretenden Phänomene. So ist neben der vollständigen Beschreibung des Verhaltens der unterschiedlichen Werkstoffe (mehrere Gummimischungen, Stahlkorde, Nylonbandagen) auch die Analyse des Verbundes von Gummi und Stahlkorde im Stahlgürtel nicht trivial zu beschreiben. Darüber hinaus ist ein Verständnis für die Interaktionen der einzelnen Strukturen im Stahlgürtelreifen bedeutsam für die geeignete Konstruktion, wobei die gewünschten Zielvorstellungen neben guter Hafteigenschaften, geringem Rollwiderstand, Haltbarkeit, geringe Geräuschentwicklung komplex und vielfältig sind. Neben der notwendigen Erfahrung im Konstruktionsprozeß und einer intensiven Nutzung der Versuchstechnik wird zunehmend auch in der numerischen Analyse des Verhaltens Erkenntnisse für eine verbesserte Reifenkonstruktion gesucht.

An dieser Stelle soll an einem exemplarischen Beispiel die Einsatzmöglichkeit der Formoptimierung auf dieses komplexe mechanische System dargestellt werden. In Abbildung 7.33 ist der Querschnitt eines PKW-Reifens qualitativ aufgetragen, auf eine quantitative Angabe aller technischen Daten wird wegen der Komplexität an dieser Stelle verzichtet.[4] Das Reifenmodell besteht damit hauptsächlich aus dem inkompressiblen Gummimaterial, für das im gesamten Reifenquerschnitt einheitliche Materialeigenschaften angenommen wurden, d.h. ein Mooney-Rivlin-Material mit

$$W = C_1 \left(\bar{\mathrm{I}} - 3\right) + C_2 \left(\bar{\mathrm{II}} - 3\right) \quad \text{sowie} \quad C_1 = 0,58\,\frac{N}{mm^2} \quad \text{und} \quad C_2 = 0,25\,\frac{N}{mm^2}.$$

Die Haupttragwirkung wird durch die Stahlgürtellagen erzielt, deren Verbund aus Stahlkorden und Gummiträger vereinfachend als verschmiertes, homogenes, orthotropes, linear-elastisches Material mit den Materialparametern $E = 210000\,\frac{N}{mm^2}$ und $\nu = 0,3$ beschrieben wurde. Die Annahme eines linear-elastischen Materials ist durch die geringen Verzerrungen in der Stahlgürtellage gerechtfertigt.

Die Beschreibung dieses Reifenmodells erfolgte unter der Berücksichtigung der Rotationssymmetrie für den Lastfall Innendruck $p = 0,15\,\frac{N}{mm^2}$. Der Kontakt des Reifens mit der Straße konnte wegen der bisher nicht zur Verfügung stehenden Sensitivitätsanalyse dieser Kontaktproblematik nicht berücksichtigt werden.

Für die Konstruktion eines Reifens ist bereits dieses Modell interessant, da zwei wesentliche Eigenschaften „eingestellt“ werden können. Zunächst ist ein gleichmäßiger radialer Verschiebungszustand („Wachstum des Reifens“ im Sprachgebrauch des Reifenkonstrukteurs) im Laufstreifenbereich des Reifens zu garantieren. Weiterhin sollte der Reifen unter diesem Grundlastfall möglichst membrangerecht die Last abtragen, was zugleich zu einer geringeren Formänderungsenergie des Reifens führt. Hieraus kann dann auch eine Verminderung des Rollwiderstands, der in Verbindung mit der dissipativen Energie des Reifens steht, erwartet werden.

[4] Ich danke der CONTINENTAL AG, Hannover, für die freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung dieser Problemstellung und für die Bereitstellung des Datenmaterials.

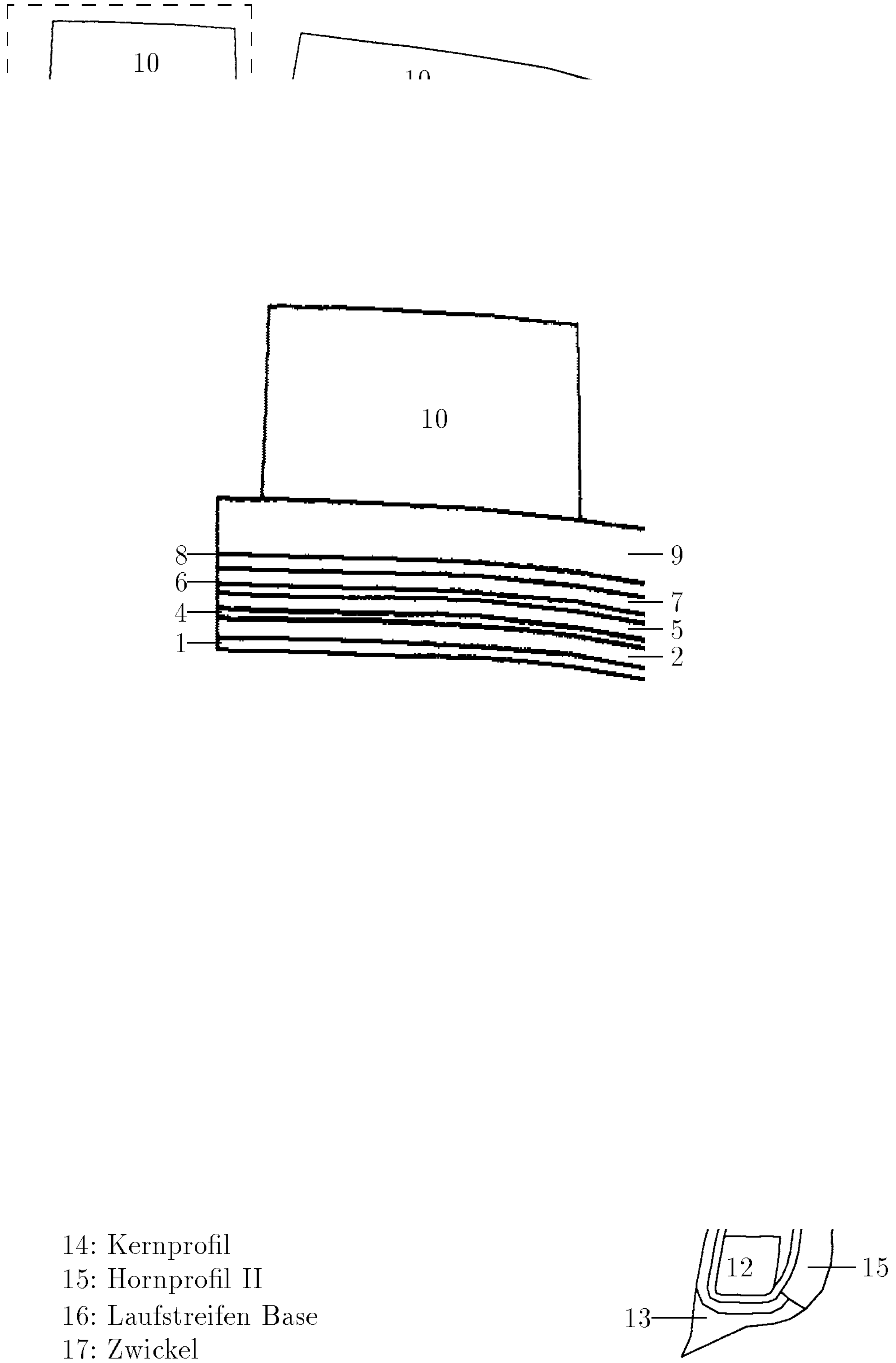

Abbildung 7.33: Reifenquerschnitt

7.4.2 Optimierungsaufgabe

Für die beispielhafte Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten der Formoptimierung wurde der Reifenquerschnitt auf die wesentlichen Tragelemente vereinfacht.

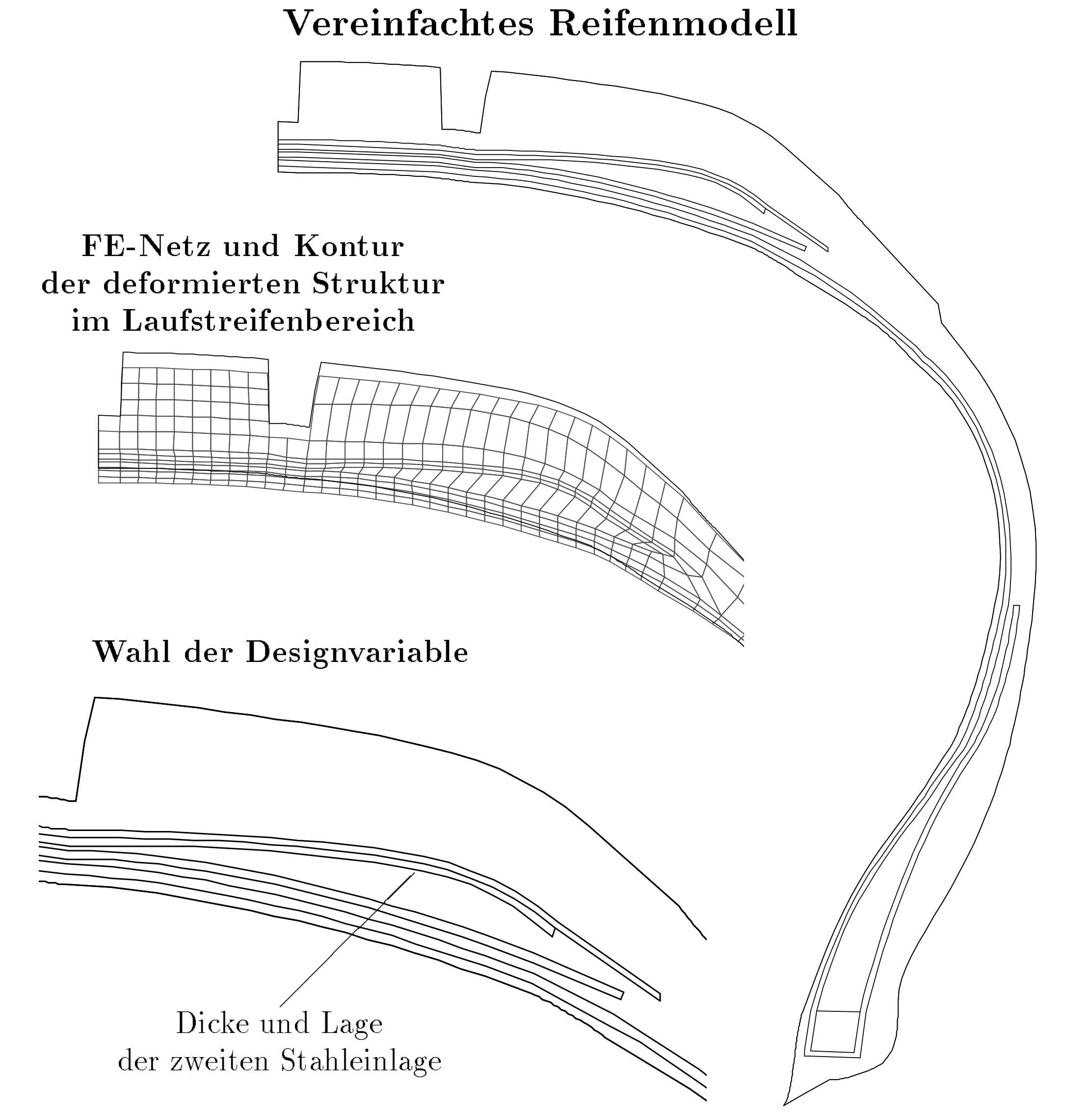

Abbildung 7.34: Vereinfachtes Modell eines Reifenquerschnitts

Die obigen Vorüberlegungen führten zu der folgenden Optimierungsaufgabe. Als Zielfunktion wurde die gesamte Formänderungsenergie des Reifens im deformierten Zustand bei einem Innendruck von $p = 0,15\,\frac{N}{mm^2}$ minimiert. Die weitere Anforderung eines gleichmäßigen Wachstums des Reifens wurde über eine Nebenbedingung an die Radialverschiebungen im Laufstreifenbereich in das Optimierungsproblem eingebracht, die mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01\,mm$ den Wert von $0,5\,mm$ betragen soll. Veränderbar (innerhalb vorgegebener Schranken) war bei dieser Untersuchung die Dicke und die Form der oberen Stahlgürtellage, die in dem Geometriemodell durch Bézierkurven dargestellt wurde.

Für die Modellierung der rußgefüllten Gummimischungen konnte in guter Näherung ein quasi-inkompressibles Material (mit $\nu = 0,4995$) angenommen werden. Für diese Situation tritt, wie vielfach in der Literatur beschrieben, ein „Locking-Phänomen“ auf, das die Behandlung der Struktur mit reinen Verschiebungsansätzen unmöglich macht. Der Reifenquerschnitt wurde deshalb im axialsymmetrischen Verzerrungszustand unter Verwendung der in Kapitel 4 beschriebenen gemischten Methode berechnet. Hierbei stellt die Inkompressibilität eine Nebenbedingung auf Elementebene dar, die nicht wie beim ebenen Spannungszustand zwängungsfrei erfüllt werden kann.

Im Reifenquerschnitt treten aufgrund der unterschiedlichen Faserwinkel der Stahleinlagen untereinander besonders im Zwickelbereich (Materialgruppe 17 in Abbildung 7.33) hohe lokale Scherbeanspruchungen bis zu 50% Dehnung auf. Die Reifenkonstruktion versucht dieser Situation durch den gezielten Einsatz unterschiedlicher Gummimischungen mit spezifischen Eigenschaften gerecht zu werden.

Die für den Optimierungsalgorithmus erforderlichen analytischen Sensitivitäten sind in Kapitel 5 hergeleitet worden. Die Richtigkeit der Implementation wurde durch Vergleich mit vollständig numerisch berechneten Gradienten kontrolliert. Dabei zeigte die analytische Sensitivitätsanalyse bei diesem komplexen nichtlinearen Strukturmodell die erwarteten Rechenzeitvorteile.

Die Optimierungsberechnung ergab durch die gezielte Veränderung der Dicke und Lage der oberen Stahleinlage eine 3,8%-tige Abnahme der gesamten Formänderungsenergie des Reifens. Dabei nahm das Gewicht dieser Stahleinlage zusätzlich um 9% ab. Das gleichmäßige Wachstum des Reifens im Laufstreifenbereich wurde dabei vom Optimierungsalgorithmus durch die Beachtung der gewählten Nebenbedingungen garantiert.

7.4.3 Einsatzmöglichkeiten der Formoptimierung in der industriellen Reifenentwicklung

Das hier dargestellte Anwendungsbeispiel deutet an, in welcher Form die Formoptimierung innerhalb des Konstruktionsprozesses eines Stahlgürtelreifens eingesetzt werden kann. Das ein praktischer Einsatz in der Industrie auch tatsächlich lohnend ist und deshalb durchgesetzt werden sollte, möchte ich abschließend begründen.

Ein erster Grund liegt darin, das ein Reifen in hohen Stückzahlen produziert wird und somit schon geringe Gewichtseinsparungen die Entwicklung und den Einsatz von Optimierungssoftware amortisiert. Dieses Argument trifft auch auf die verbesserten Eigenschaften wie Rollwiderstand, Haltbarkeit usw. zu, die z.B. den Brennstoffverbrauch eines Fahrzeuges verringern.

Weiterhin ist anzumerken, daß die Reifenentwicklung weit fortgeschritten ist, so daß große Qualitätssprünge allein aus der Erfahrung der Konstrukteure heraus nur schwer zu erreichen sind. Hierzu sind verfeinerte Methoden, wie z.B. eine intensive Nutzung numerischer Hilfsmittel, erforderlich.

Während die obigen Gründe sicherlich schnell akzeptiert werden, stellt sich die Frage einer baldigen Einsatzfähigkeit der Formoptimierungssoftware im industriellen Umfeld. Die großen Schwierigkeiten in der praxisrelevanten Anwendung der Formoptimierung auf Industrieprobleme sehe ich in der notwendigen Verknüpfung bestehender flexibler

CAD-Systeme über leistungsstarke Netzgeneratoren mit vorhandenen kommerziellen FE-Programmsystemen, die zudem, wie in diesem Fall, die Fähigkeit zur Berechnung nichtlinearer Phänomene besitzen müssen.

Hierzu sei zunächst erwähnt, daß das Geometriemodell eines Reifens vollständig in einer Querschnittsebene beschrieben werden kann. Zudem ist der Aufbau eines Reifens prinzipiell gleichbleibend, so daß die Anforderungen an eine praxisrelevante CAD-Beschreibung und ihre möglichen geometrischen Designvariablen bekannt und im Vergleich zu der Vielfalt möglicher Geometrieformen im Allgemeinen Maschinenbau doch beschränkt sind.

Weiterhin werden für den Optimierungsprozeß keine großen Geometrieänderungen erwartet, so daß die Güte der FE-Netze während des Optimierungsprozesses ohne große Probleme zu gewährleiten ist. Ebenfalls sind zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens nur wenige unterschiedliche Elementformulierungen erforderlich, so daß die Modifikation und Erweiterung des Elementquellcodes auf die Erfordernisse der Sensitiviätsanalyse mit begrenztem Aufwand möglich erscheint.

Alles in allem scheint trotz der vorhandenen geometrisch und physikalisch nichtlinearen Phänomene im Reifen aufgrund der klaren geometrischen Struktur ein baldiger Einsatz möglich. An dieser Stelle sollte jedoch auch erwähnt werden, daß die relevanten Phänomene im Reifen vor dem Einsatz von Optimierungssoftware zunächst in der Strukturanalyse qualitativ und auch quantitativ richtig beschrieben werden müssen.