

# Sprengfaltung von Stahlbetonschornsteinen

Dr.-Ing. Rainer Melzer

Planungsbüro für Bauwerksabbruch, Dresden, Germany

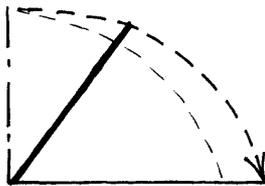
**ABSTRACT:** Multiple blast or “folding blast” of industrial smokestacks constructed with reinforced concrete is an excellent solution to collapse this ones in a small bordered area. A simple tilted smokestack needs about 125 % of its height as length for its soil impact. If you create a folding blast with a zickzack-collapse figure you get a impact length in a fraction of the smokestack height.

There are lesser problems with deviations from planned tilting direction because the chimney executes more a collapse then tilting and its behaviour is more according the principle of minimal energy.

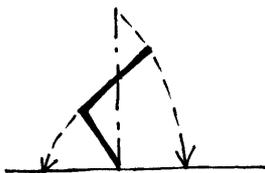
Vibrations caused by soil impact will be reduced too because of energy divergence by self-destroying and because of the longer time to input the energy into the soil.

In Germany have been executed 21 folding blasts of large smokestacks in the last 5 years. The four most impressive examples here are shown.

## 1. Allgemeines



Bei der herkömmlichen Fallrichtungssprengung von Stahlbetonschornsteinen wird eine Aufpralllänge von etwa 125 % der Schornsteinhöhe benötigt. Fallrichtungsabweichungen können dann schon zu erheblichen Abweichungen führen. Bei sehr hohen Schornsteinen steht diese Länge jedoch häufig nicht zur Verfügung, so dass ein teurer Maschinenabbruch „droht“. Dazu gibt die „Sprengfaltung“ jedoch eine Alternative.



Mit in unterschiedlichen Höhen wechselseitig geöffneten sog. Sprengmälern, die zu unterschiedlichen Zeiten detonieren, kann man bei hohen Stahlbetonschornsteinen die verschiedenartigsten Einsturzfiguren erzeugen. Ich bin in der Lage, solche Einsturzfiguren zu berechnen.

Bei einer Zickzack-Einsturzfigur schieben sich die Schornsteinabschnitte gegenseitig in ihre Fallrichtung. Sie helfen sich gewissermaßen gegenseitig und vergrößern so die Sicherheit des Einsturzes. Durch die Minimierung der erforderlichen Einsturzenergie – die geringste Energie benötigt ein Schornstein beim senkrechten Einsturz – wird grundsätzlich auch die Sicherheit des Beibehaltens der **Einsturzrichtung** erhöht.

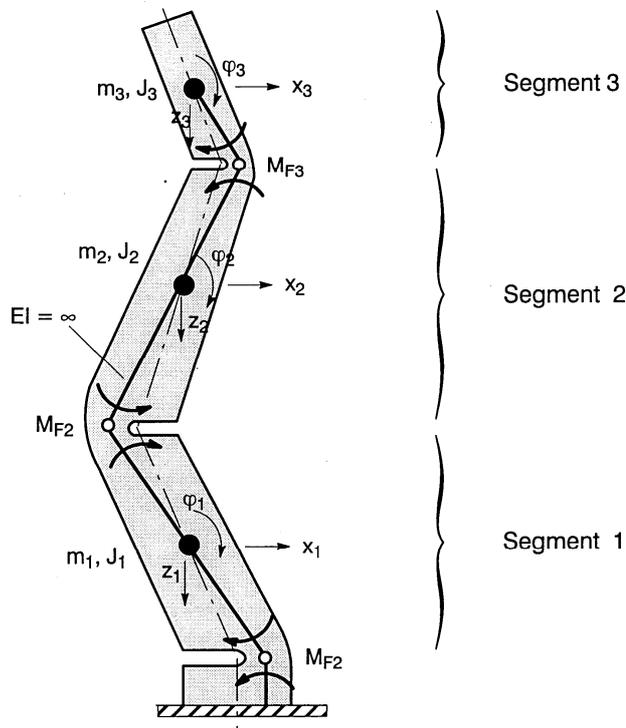
Neben dem immer beobachteten Effekt der Fallängenverkürzung wurden häufig auch geringe Aufprallerschütterungen gemessen. Ich führe die relativ geringen Schwingwerte auf den hohen Grad an Selbstzerstörung mit entsprechender Energiezerstreuung und auf die zeitliche Streckung des Aufprallvorgangs zurück.



Bis jetzt wurden in Deutschland 21 Stahlbetonschornsteine mit Höhen zwischen 80 m und 300 m erfolgreich mit einer Mehrfachsprengung zusammengefallen. In der Schweiz wurde ein Schornstein in Liesberg mit einer Mehrfachsprengung verkürzt niedergebracht.

Die Anwendung der Sprengfaltung muss nicht auf Schornsteine begrenzt bleiben. Auch andere hohe Bauwerke, wie Türme und Hochhäuser, können mit einer Mehrfachsprengung in einer zickzackförmigen Einsturzfigur zu Boden gebracht werden.

## 2. Berechnungsmodell zur Sprengfaltung



Kräftegleichgewicht am Segment i

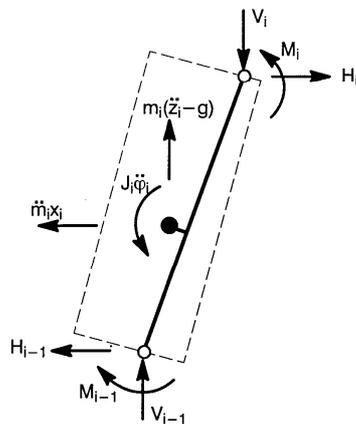


Bild 1.4: Kräftegleichgewicht am Segment "i"

$$m_i \ddot{x}_i + H_{i-1} - H_i = 0 \quad (5)$$

$$m_i (\ddot{z}_i - g) + V_{i-1} - V_i = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} J_i \ddot{\varphi}_i + M_i - M_{i-1} - V_i (b_i \sin \varphi_i + c_i \cos \varphi_i) \\ + V_{i-1} (c_{i-1} \cos \varphi_i - a_i \sin \varphi_i) \\ - H_{i-1} (b_i \cos \varphi_i - c_i \sin \varphi_i) \\ - H_{i-1} (c_{i-1} \sin \varphi_i + a_i \cos \varphi_i) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Durch die Sprengzonen entsteht aus dem Schornstein eine schiefe Gelenkkette. Die Schornsteinabschnitte zwischen den Sprengzonen werden als Starrkörper mit ihrer Masse  $m$  und ihrem Massenträgheitsmoment  $J$  idealisiert. Sie sind zumindest anfänglich durch Fließgelenke miteinander verbunden.

Das Kräftegleichgewicht zwischen den Massenträgheitskräften und den Gelenkkraften jedes Schornsteinsegmentes liefert in der Ebene drei Differentialgleichungen. Mit  $N$  Segmenten stehen  $3N$  Gleichungen für eine numerische Lösung zur Verfügung. Das Ergebnis liefert die Bewegungen der Segment-Starrkörper um ihren Schwerpunkt.

### 3. Beispiele zur Sprengfaltung von Stahlbetonschornsteinen

#### 3.1 Schornstein im Kraftwerk Hagenwerder, 250 m hoch

##### Sprengung durch Roller Sprengtechnik GmbH am 19. Juni 1998

Der Schornstein wurde 1971 errichtet. Der zweietagig unterkellerte Fuß war als Kegelschale aus Stahlbeton mit einem unteren Durchmesser von 32 m und einer Wanddicke von 66 cm ausgebildet. Im Schornsteinfuß stand ein Standfutter aus Stahlbeton bzw. Mauerwerk befand. Über der Kegelschale stand ein schwach konischer Schornsteinschaft aus Stahlbeton mit Wandstärken von unten 60 cm bis oben 18 cm. Das Schornsteinfutter aus Mauerwerk war als sog. Trommelfutter ausgebildet, d.h., es stützte sich über Konsolringe jeweils auf dem Schaft ab. Die Gesamtmasse des Schornsteins über Geländehöhe betrug rund 15000 t.

Um den Schornstein mit verkürzter Falllänge zu Boden zu bringen, wurde eine dreiteilige Sprengfaltung ausgeführt. Das untere Sprengmaul in Geländehöhe war dabei in Fallrichtung geöffnet und detonierte zum Zeitpunkt 0, das 67 m über Gelände angeordnete mittlere Sprengmaul war entgegen der Fallrichtung und das obere Sprengmaul in 120 m Höhe war wieder in Fallrichtung geöffnet. Beide obere Sprengzonen detonierten 4,0 s später.

Die Berechnung der optimal erscheinenden Kippfigur des Schornsteins erfolgte mit einem Computerprogramm und variierten Detonationszeiten. Vorausgesetzt wurde allerdings eine gewisse Haltbarkeit der Schornsteinrestquerschnitte in den Sprengzonen. Mit der Berücksichtigung von Richtungsabweichungen, einer eventuellen Verlängerung der Segmente durch Fliehkräfte und einer Verbreiterung durch den Bodenaufprall wurden Aufpralllängen von 100 m in die Hauptfallrichtung und 50 m nach den anderen Seiten hin erwartet.

Die Computersimulation im Bild 1 zeigt die Prognose des Einsturzvorganges.

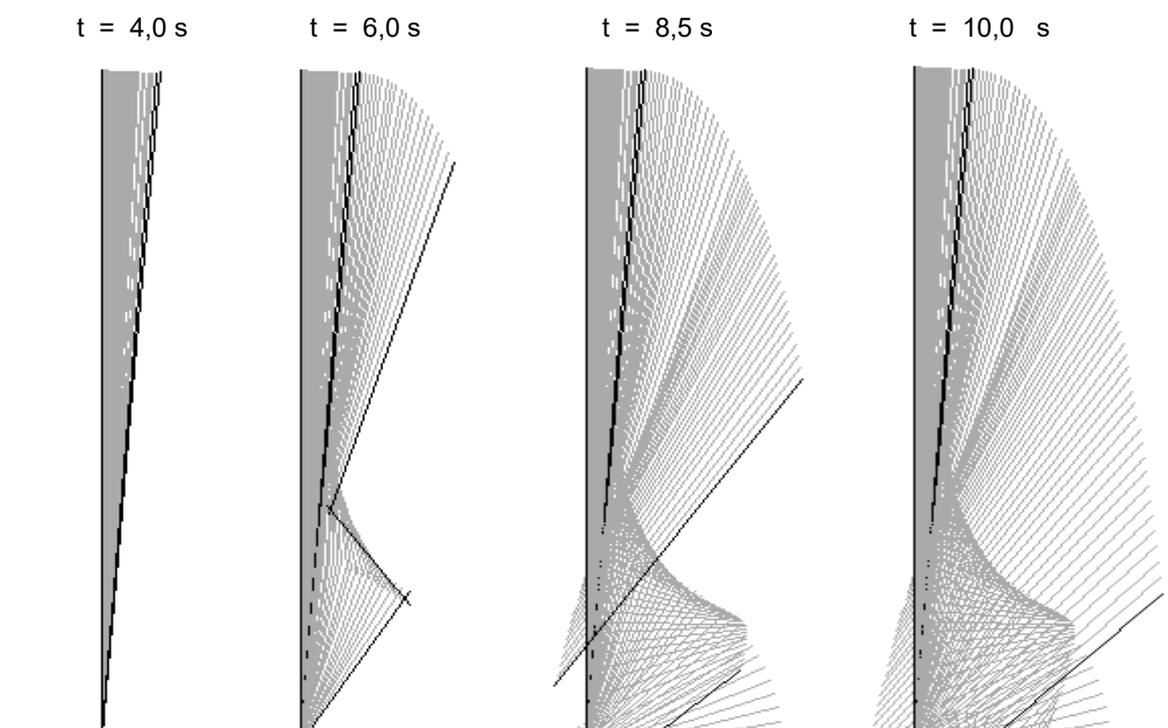


Bild 1



Bild 2: realisierte Einsturzfigur des 250 m hohen Schornsteins im Kraftwerk Hagenwerder (exakte Fotomontage)

Nach einem Ankippen um nur rund 1/10 des Kopfdurchmessers versagte die Kegelschale des Schornsteinfußes und ließ den Schornstein gewissermaßen im Erdboden versinken. Die während des Kollabierens detonierenden oberen Sprengmäuler erzeugten noch die Andeutung einer Faltfigur, die auch das Oberteil in die richtige Richtung kippen ließ.

Der Schornstein führte während des Einsturzes ca. 1/8 Umdrehung um seine Längsachse aus.

Die Übereinstimmung des Einsturzes mit der Vorausberechnung war durch den vorzeitigen Kollaps allerdings nicht zufriedenstellend.

Das Sprengergebnis hingegen stellte alle Beteiligten voll zufrieden.

Die erzielte Aufpralllänge betrug nur 97 m. Die Abweichung von der Planfallrichtung lag bei etwa 8°.

Die Aufprallerschütterungen waren an der hohen Schornsteinenergie gemessen sehr gering.

## 3.2 Schornstein im Heizkraftwerk Rostock-Bramow, 160 m hoch

### Sprengung durch TVF Thyssen-VEAG Flächenrecycling GmbH am 1. Juli 1998

Eine einfache Fallrichtungssprengung des 160 m hohen Schornsteins im ehemaligen Heizkraftwerk Rostock-Bramow hätte eine Aufpralllänge von rund 200 m erfordert. Dafür reichte das Gelände des Kraftwerkes nicht aus. Die Warnow, angrenzende Industrieanlagen und Straßen begrenzten die Falllänge auf rund 100 m nach vorn und 40 m nach hinten.

Der 1976 errichtete Schornstein besaß einen annähernd zylindrischen Stahlbeton-Schaft, der allerdings mit einem 5 m hohen Mauerwerkskopf endete. Das Mauerwerksfutter wurde vor der Sprengung bis auf den Kopfbereich entfernt. Zur Sprengung betrug die Schornsteinmasse über dem Fundament 3021 t.

Bei den gegebenen Platzverhältnissen erschien eine zweiteilige Faltung angemessen. Das untere Sprengmaul lag in Geländehöhe direkt über dem Fundament. Es war in Fallrichtung geöffnet und detonierte zum Zeitpunkt 0, das in 75 m Höhe über Gelände angeordnete obere Sprengmaul war nach hinten geöffnet und detonierte 4,5 s später.

Die maximale Aufpralllänge wurde nach vorn mit 100 m und nach hinten mit 40 m erwartet. Hinsichtlich der Haltbarkeit der Sprenggelenke war durch die zylindrische Bauform und den guten Schaftbeton mehr Optimismus vorhanden.

Die Computersimulation im Bild 3 zeigt die Prognose des Einsturzvorganges.

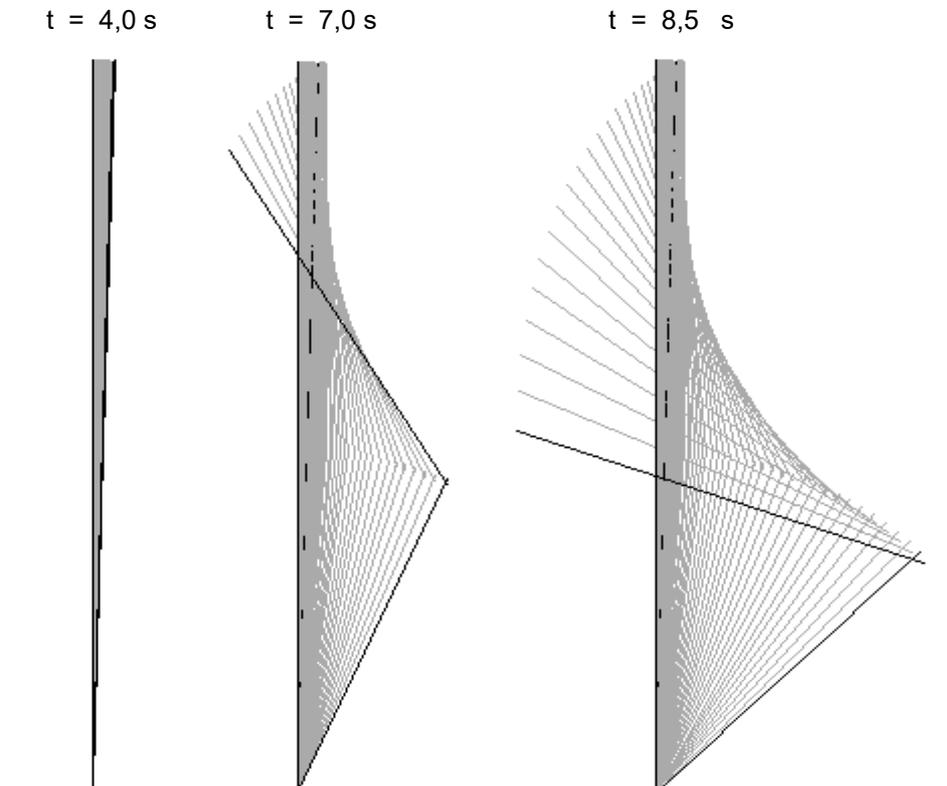


Bild 3 (oben): Computersimulation des Einsturzvorgangs

Bild 4 (links): realisierte Einsturzfigur des 160 m hohen Schornsteins in Rostock (exakte Fotomontage)

Die realisierte Einsturzfigur zeigt das deckungsgleiche Foto-Overlay im Bild 4. Die Schornsteinsegmente rotierten in Wirklichkeit zwar etwas langsamer als in der Simulation und die Sprenggelenke kollabierten örtlich, aber die Übereinstimmung war recht gut. Die Rauchflächen neben dem Schornstein wurden in der Montage abgeschnitten und es wird deutlich, dass sich bei Kippwinkeln von etwa  $45^\circ$  die Segmente voneinander lösen und getrennt weiter abstürzen. Die jeweils benachbarten Segmente sind dann nur scheinbar noch durch die „Rauchkörper“ der Foto-montage verbunden.

Der 5 m hohe Mauerwerkskopf kam ca. 15 m hinter dem Schornsteinmittelpunkt auf. Nach



vorn wurden nur etwa 70 m in Anspruch genommen.

### 3.3 Schornstein im Kraftwerk Thierbach, 300 m hoch

Sprengung am 18. Oktober 2002 durch:

**TVF Thyssen-VEAG Flächenrecycling GmbH**

Der 300 m hohe Schornstein wurde 1967 errichtet. Er bestand aus einem Stahlbetonschaft und einem Mauerwerksfutter. Am Fuß besaß er einen Durchmesser von 33 m. Am Kopf betrug der Durchmesser noch 11,35 m. Die Gesamtmasse des Schornsteins ohne Fundament betrug 22683 t.

Für den 300 m hohen Schornstein standen nach hinten 60 m und nach vorn 120 m Aufpralllänge zur Verfügung.

Diese Aufpralllängen wären sicher auch mit einer Dreifachfaltung einzuhalten gewesen. Da hier allerdings großer Wert auf eine Minimierung der Staubemission gelegt wurde, sollte eine Vierfachfaltung durch einen besonders steilen Kollaps auch dazu beitragen. Die Sprengmäuler wurden wechselseitig geöffnet an den Außenbühnen in 165 m, 120 m und 75 m Höhe vorbereitet. Das untere Sprengmaul befand sich in Geländehöhe.

Das obere Maul detonierte zuerst. Die anderen Sprengmäuler detonierten gleichzeitig nur 1,5 s später.

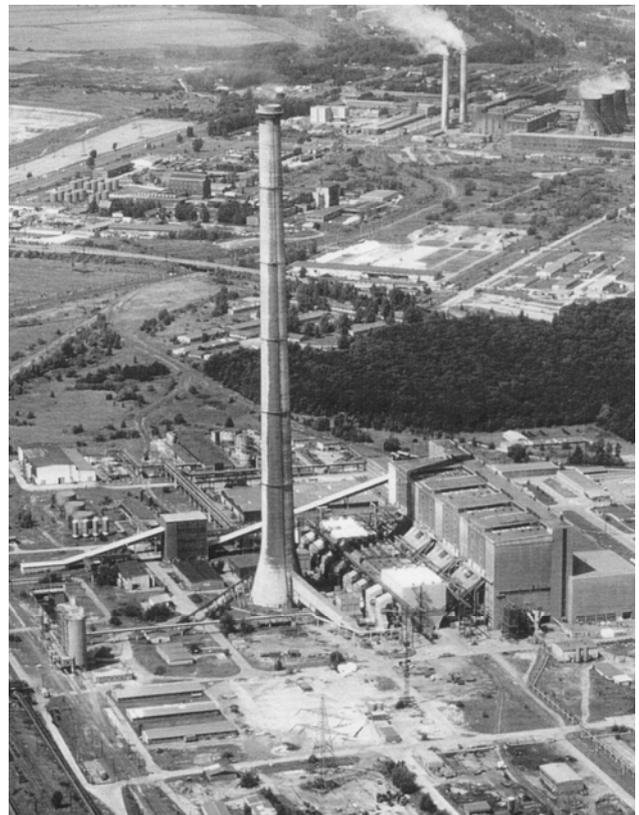


Bild 6: Simulation der Einsturzfigur des 300 m hohen Schornsteins Thierbach:

$t = 4,0 \text{ s}$

$t = 6,0 \text{ s}$

$t = 8,5 \text{ s}$

$t = 10,0 \text{ s}$

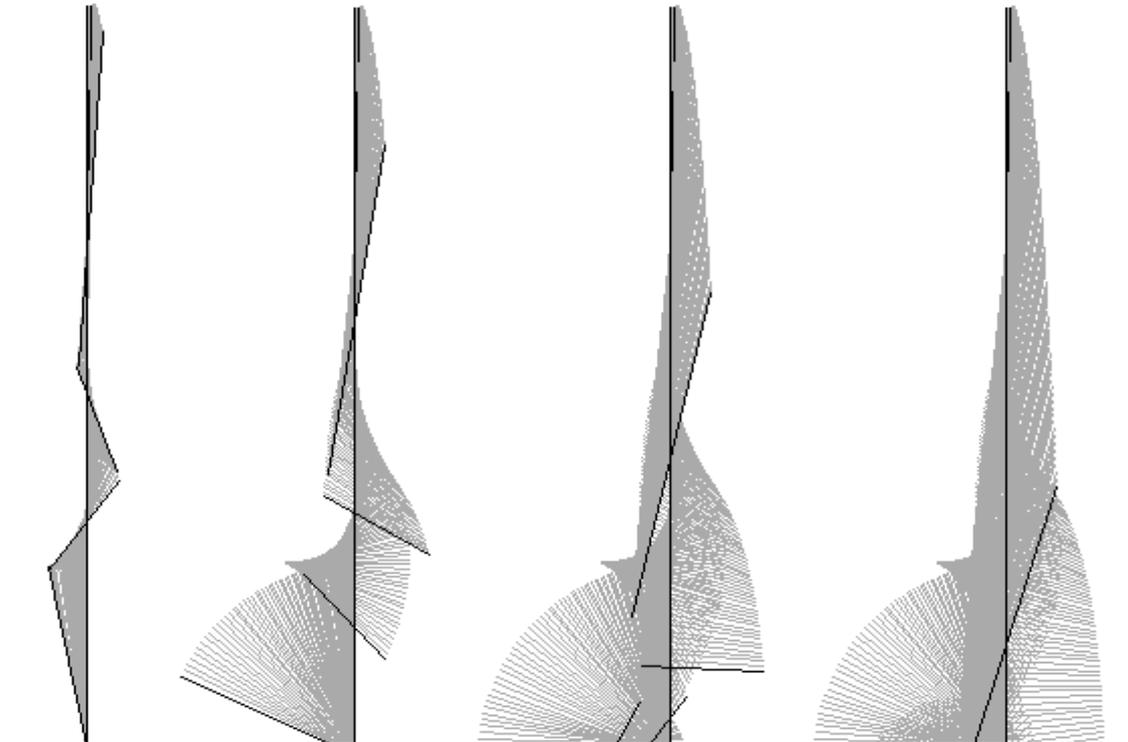
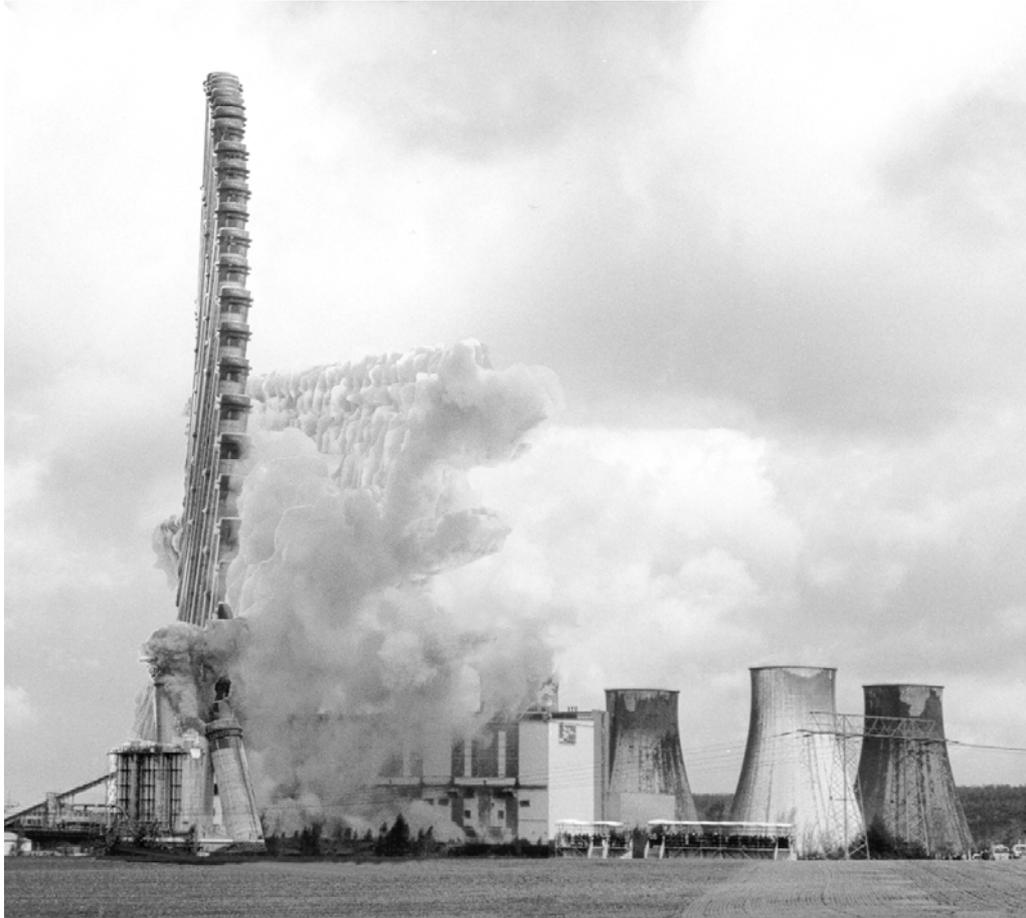


Bild 7: realisierte Einsturzfigur des 300 m hohen Schornsteins im Kraftwerk Thierbach (exakte Fotomontage, Blick mit einem Winkel von etwa  $70^\circ$  zur Kipprichtung)



Die Fotoparallaxe verleiht dem Schornstein leider eine Schiefstellung, die in Wirklichkeit natürlich nicht vorhanden war.

Der Einsturz erfolgte so steil wie erwartet. Allerdings kam der Kippvorgang des 75 m hohen Unterteils bei einer Neigung von etwa  $15^\circ$  zum Stehen. Die anderen Schornsteinabschnitte zerstörten sich selbst auf diesem Unterteil.

Die vom Schornstein beanspruchte Aufpralllänge betrug nach vorn nur etwa 60 m und etwa 30 m in die rückwärtige Richtung. Unglücklich aneinander gelehnt blieben jedoch zwei etwa 45 m hohe Abschnitte des Unter- und des Oberteils stehen, mit denen der Abbruchbagger noch etwa zwei Wochen kämpfte.

### 3.4 Schornstein im Kraftwerk Erlangen, 200 m hoch

**Sprengung: Thüringer Sprenggesellschaft mbH am 10. November 2002**

Der 1966 errichtete Schornstein besaß über dem Fundament eine Masse von 7411 t. Der Schaft bestand aus Stahlbeton. Das Trommelfutter und der Schaftkopf waren aus Mauerwerk hergestellt.

Für den 200 m hohen Schornstein standen nach hinten 7 m und nach vorn 120 m Aufpralllänge zur Verfügung. Hier wurde eine dreiteilige Faltung gewählt.

Dazu wurde das obere Sprengmaul in 61 m Höhe über Gelände angeordnet. Es war in die Hauptfallrichtung geöffnet. Das mittlere Sprengmaul lag in 38 m Höhe über Gelände und war entgegengesetzt zur Hauptfallrichtung geöffnet. Das untere Maul lag in Geländehöhe und war wiederum in die Hauptfallrichtung geöffnet.

Die Fattersprengmäuler wurden oben mit angelegten Ladungen realisiert. Im Erdgeschoss wurde der Futterstuhl aus Stahl mit Schneidladungen gekippt.

Das obere Maul detonierte zuerst. Das mittlere und untere Sprengmaul detonierten gleichzeitig 3,5 s später.

Bild 8: Simulation der Einsturzfigur des 200 m hohen Schornsteins Erlangen:

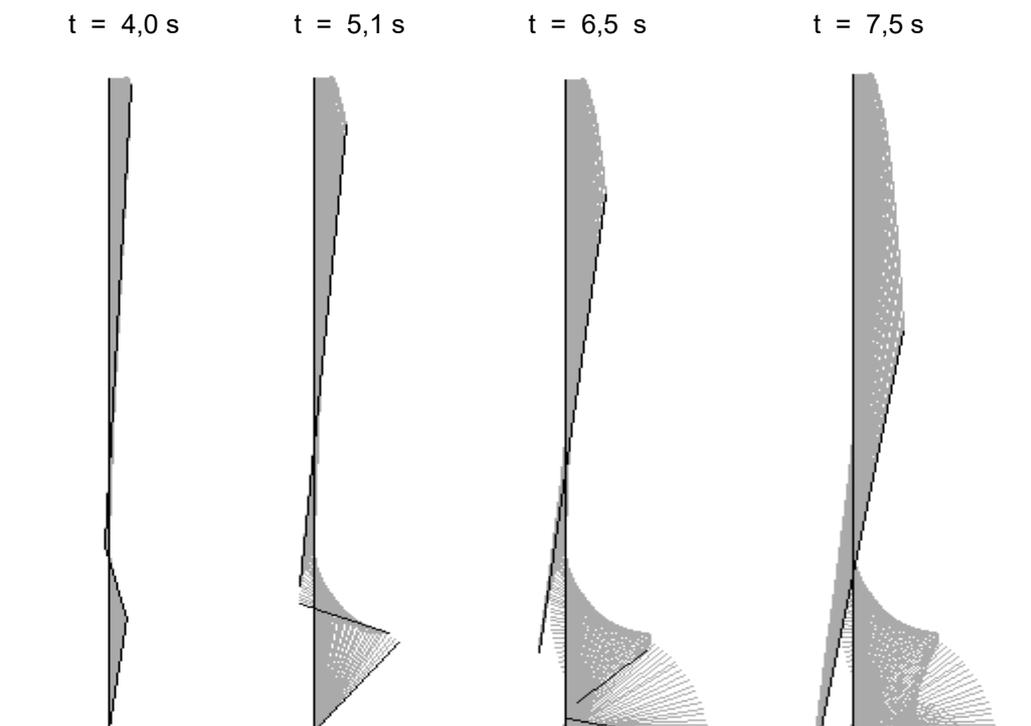


Bild 9 (links):

realisierte Einsturzfigur des 200 m hohen Schornsteins im Kraftwerk Erlangen (exakte Foto-montage, Blick mit einem Winkel von etwa  $45^\circ$  zur Kipprichtung)

Kurz vor der Detonation der unteren Sprengmäuler kollabierte der Schornstein an der oberen Sprengzone. Das führte zu einem sehr steilen Einsturz des Oberteils mit vollständiger Selbstzerstörung beim Bodenaufprall.

Die Übereinstimmung mit der Computersimulation war trotzdem recht gut.

Nach vorn wurden nur etwa 50 m und nach hinten etwa 6 m Falllänge in Anspruch genommen.

Die Aufprallerschütterungen blieben gemessen an der hohen Schornstein-energie sehr gering

#### 4. Aufprallerschütterungen

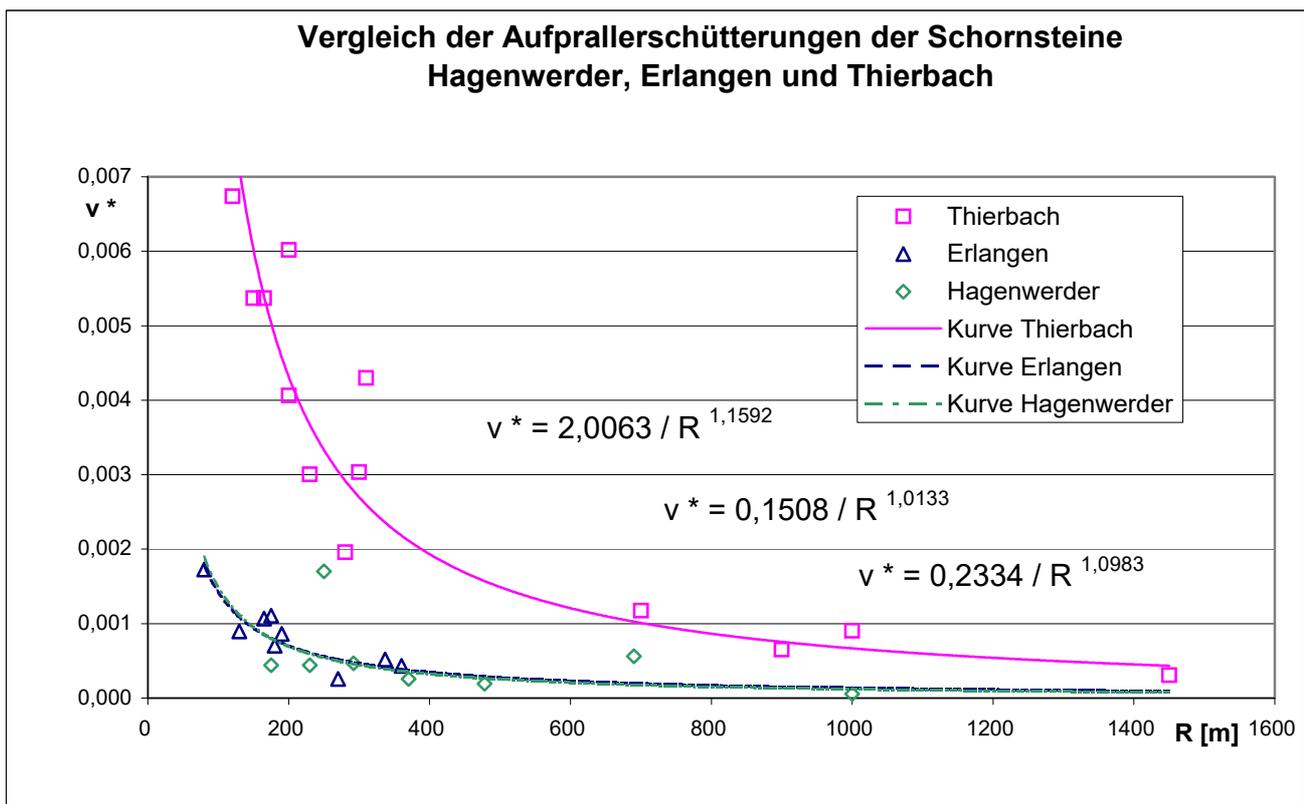
Die mit hoher Energie aufrallenden Schornsteine erzeugen Bodenerschütterungen, deren Größe für die Beurteilung der Gefährdung umliegender Bauwerke abgeschätzt werden muss.

Die Messung der maximalen Schwinggeschwindigkeitskomponenten  $V_i$  an fundamentnahen Punkten von Bauwerken in der Nachbarschaft der Schornsteinsprengungen liefert Datenmaterial für die Aufstellung empirischer Formeln mit einer Grundform nach DIN 4150/03

$$V_i = \alpha \sqrt{E} / R^\beta \quad (\text{E...pot. Energie in kNm, } R\text{...Abstand vom Erschütterungszentrum in m})$$

Die Freiwerte  $\alpha$  und  $\beta$  werden mittels Regression aus den Messwerten gewonnen. Um die Streuung der gefundenen Formelparameter zu minimieren, ist es zweckmäßig, die Schornsteine in Klassen zu unterteilen, die sich nach ihrem Aufprallverhalten unterscheiden. Die wesentlichsten Kriterien hierfür sind der Grad der Selbstzerstörung und der Zeitraum des Bodenaufpralls.

So wie für Beton- und Mauerwerksschornsteine unterschiedliche Prognoseformeln aufgestellt werden sollten, ist es sicher auch zweckmäßig, im Ganzen gekippte und „gefaltete“, also mehrfach gesprengte Schornsteine zu unterscheiden. Bei der Faltung wiederum sollte darauf geachtet werden, dass sich die Einsturzfiguren ähneln. Das war zweifellos der Fall bei drei der hier vorgestellten Schornsteine, nämlich den Schornsteinen Hagenwerder, Thierbach und Erlangen. Im Ergebnis lieferten auch Hagenwerder und Erlangen (energienormiert, also vergleichbar) fast identische und sehr geringe Erschütterungen. Die Schwingwerte in Thierbach waren jedoch deutlich größer.



( energienormierte Schwinggeschwindigkeit  $v^* = v_i / \sqrt{E}$  )

Die Ursache für den Ausreißer nach oben „Thierbach“ wird im Starrkörperzusammenprall des Ober- und Unterteils dieses Schornsteins gesehen, der offenbar zu kurzzeitig hohen Energieeinträgen in den Boden führte. Dieser Vorgang sollte durch die Wahl zweckmäßiger Einsturzfiguren zukünftig vermieden werden.