

Capítulo 3

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA CATENARIA.

Las características mecánicas de una instalación de catenaria de elevadas prestaciones, tienen como objeto obtener un funcionamiento homogéneo de la instalación, asegurando una correcta captación de corriente por el pantógrafo a la velocidad de circulación de los trenes. Para ello se evitarán los cambios bruscos en el movimiento de las masas que conforman la instalación y la concentración puntual de masas. Se prestará especial atención a la geometría de la catenaria, controlando que los parámetros geométricos, incrementos de longitud por aumento de temperatura de los cables, desplazamientos de ménsulas, compensaciones, flechas etc., se desplacen dentro de los márgenes permitidos.

Las tensiones mecánicas elevadas que se utilizan en las catenarias para velocidades elevadas, transmiten elevados esfuerzos a ménsulas, aisladores, brazos atirantado etc, utilizándose tensiones mecánicas elevadas en los cables sustentador y de contacto, y se evitará la concentración puntual de masas, distribuyendo péndolas y pesos para obtener una elasticidad a lo largo del vano, lo más constante posible.

3.1.- VANO

Se entiende como vano la distancia que existe entre dos postes contiguos que soportan a la línea aérea de contacto. La longitud del vano típico de RENFE es de 60 metros, para vías en recta o de elevado radio, reduciéndose la longitud del vano conforme disminuye el radio de la curva.

Como la catenaria está descentrada alternativamente entre 20 y 25 cm, a ambos lados del eje de la vía, es necesario buscar una relación entre la longitud del vano y el descentramiento de los hilos de contacto, con respecto al centro del pantógrafo y obtener el valor máximo de este descentramiento a fin de asegurar que en ningún caso los hilos de contacto queden fuera de la zona de frotamiento del pantógrafo. A esta relación se ha de añadir la acción que el viento lateral puede ejercer sobre la línea aérea de contacto, desviandola de su posición inicial.

La zona de frotamiento de los hilos de contacto sobre el pantógrafo no debe exceder de la longitud máxima del semipantógrafo, pudiendose aceptarse como extrema, para cualquier situación, la situada a 60 cm respecto del eje.

Consideraremos la proyección de la catenaria sobre el plano horizontal, sometida a una tensión mecánica igual a la suma de las tensiones de los hilos de contacto mas la correspondiente al sustentador, estando además expuesta a la acción de un posible viento transversal. Las tensiones que deben ser tenidas en cuenta son las mínimas con viento máximo, que pueden dar el máximo descentramiento, pudiendo presentarse los siguientes casos:

1º.- Vano situado en recta y sin descentramiento

2º.- Vano situado en recta y con descentramiento

3º.- Vano situado en curva y con descentramiento

3.1.1.- VANO IDEAL EN RECTA Y SIN DESCENTRAMIENTO.

En este caso ideal, por efecto del viento, la catenaria toma una posición de equilibrio con la desviación d , en el centro del vano

La ecuación de equilibrio será: $\tau = F_v$, siendo τ = Tensión radial de la catenaria y F_v es la fuerza del viento que corresponde a aplicar en el centro del vano.

La fuerza del viento se puede obtener mediante la expresión

$$F_v = \frac{V \cdot a}{2}$$

donde V es el esfuerzo del viento por unidad de longitud, del conjunto de cables que integran la catenaria, que se obtendrá según se indica en el apartado 3.4.2 y a es la longitud del vano.

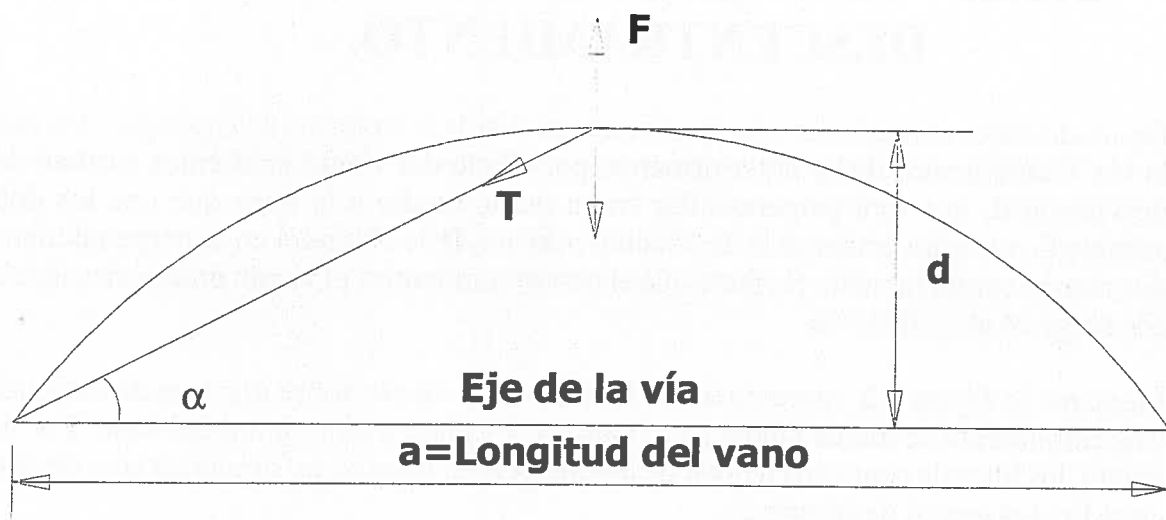


Figura 3.1.- Efecto del viento lateral sobre la catenaria

La tensión radial de los cables en el centro del vano, se puede obtener mediante la expresión

$$\tau = 2 \cdot T \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad \text{siendo} \quad \operatorname{sen} \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{a/2} \quad \text{obtenemos que}$$

$$\tau = 2 \cdot T \cdot \frac{d}{a/2} = \frac{4 \cdot T \cdot d}{a}$$

Sustituyendo valores $\frac{V \cdot a}{2} = \frac{4 \cdot T \cdot d}{a}$ de donde $a = \sqrt{\frac{8 \cdot T \cdot d}{V}}$

El semieje del pantógrafo tiene una longitud aproximada de 62 cm, luego según el grado de margen de seguridad se adoptará un valor d_{\max} con lo que tendremos que la longitud máxima del vano a estará definida por la expresión:

$$a \leq \sqrt{\frac{8 \cdot T \cdot d_{\max}}{V}}$$

O bien si conocemos el vano, podremos obtener la desviación máxima en el centro del vano, mediante la expresión

$$d_{\max} = \frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T}$$

que siempre deberá ser menor que la longitud del semipantógrafo.

3.1.2.- VANO EN RECTA Y CON DESCENTRAMIENTO.

En condiciones normales, el hilo de contacto se desplaza en forma de zig-zag a cada lado del eje de la vía. Como hemos dicho anteriormente, por efecto del viento tendremos a mitad del vano una desviación d , que será perpendicular en su punto medio a la línea que une los dos brazos de atirantado, pero sin embargo la desviación máxima D se obtendrá en la perpendicular a la vía, ya que recoge conjuntamente el efecto que el descentramiento y el viento producen sobre la catenaria, con respecto al eje de la vía.

Mediante la figura 3.2, representamos la acción del viento sobre un vano de catenaria, donde el descentramiento se indica mediante el valor **b**, y siendo **a** la longitud del vano. Por la acción del viento, los hilos de contacto en lugar de mantenerse en línea recta forman un arco de circunferencia entre los dos puntos de atirantado.

El valor del radio de este arco de circunferencia lo podemos determinar de forma analítica tal y como se indica en la figura 3.2, para ello buscamos el valor de **D** en función de **d** y **b** en el triángulo rectángulo OEC, y tendremos que

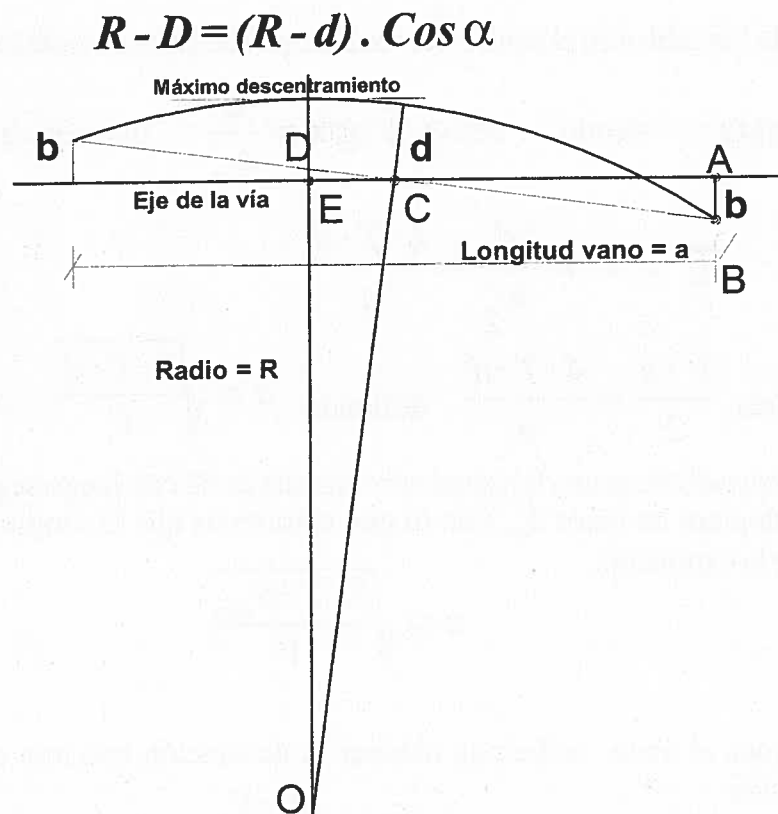


Figura 3.2.- Efecto del viento sobre la catenaria en recta con descentramiento

En el triángulo ABC tendremos que $\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a/2}$ y como $\cos \alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$

Despejando D obtendremos que $D = R - (R - d) \cdot \cos \alpha$

Sustituyendo en la expresión anterior el por su valor, obtendremos que

$$D = R - (R - d) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \text{ sustituyendo a continuación, obtenemos que}$$

$$D = R - (R - d) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{b^2}{a^2/4}\right)}} \quad \text{Que desarrollando obtenemos la expresión:}$$

$$D = R - (R - d) \cdot \sqrt{\frac{a^2}{a^2 + 4b^2}}$$

D: Desplazamiento máximo de la catenaria respecto de la vía.

R: Radio de la curva

d: Desplazamiento de la catenaria en el centro del vano

a: Longitud del vano

b: Descentramiento en el apoyo

El radio de la curva que forman los cables, lo podemos obtener mediante las expresiones que se

Deducen de la figura 3.3, en donde $x^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 = (d + x)^2$

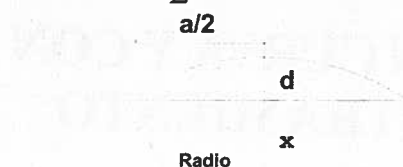


Fig 3.3

Desarrollando y sumando **d** a los dos términos de la expresión se obtiene que

$$R = \frac{d}{2} + \frac{a^2}{8 \cdot d}$$

siendo el valor d , el que corresponde a d_{max} que se obtiene mediante la expresión:

$$d_{max} = \frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T}, \text{ que sustituyendo en la expresión anterior obtendremos que } R = \frac{a^2 \cdot V}{16 \cdot T} + \frac{T}{V}$$

Sustituyendo este valor en la expresión: $D = R - (R - d) \cdot \sqrt{\frac{a^2}{a^2 + 4b^2}}$

obtendremos que $D = \left(\frac{a^2 \cdot V}{16 \cdot T} + \frac{T}{V} \right) - \left(-\frac{a^2 \cdot V}{16 \cdot T} + \frac{T}{V} \right) \cdot \sqrt{\frac{a^2}{a^2 + 4b^2}}$

Si aplicamos esta expresión para el cálculo del descentramiento máximo que se puede producir a lo largo de un vano de 60 metros, para una catenaria formada por dos hilos de contacto de 107 mm², con una tensión mecánica de 1000 kg cada hilo, y con un descentramiento en los apoyos de 25 cm.

V: La presión que le corresponde a cada hilo de contacto de 107 mm², por efecto del viento es, según la tabla 3.19 igual a 0,73 kg/m.l.
0,73 kg/m.l. x 2 hilos = 1,46 kg/m.l.

a: Longitud del vano: 60 metros

T: Tensión mecánica de los dos hilos. 2 hilos x 1000 kg = 2000 kg

b: Descentramiento en los apoyos: 0,25 m

Sustituyendo valores obtenemos que para los valores indicados el descentramiento máximo que se produce es de 37,6 cm

3.1.3.- VANO EN CURVA Y CON DESCENTRAMIENTO

Considerando las hipótesis más desfavorables, es decir, vía en curva y viento transversal soplando hacia el interior de la curva. La desviación d producida en el hilo de contacto es definida por la ecuación

siendo
$$d = \frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T}$$

a .- Longitud del vano

V .- Suma de esfuerzos debidos al viento por unidad de longitud en hilos de contacto y sustentador

T .- Suma de las tensiones mecánicas de los hilos de contacto y sustentador

Por otra parte, el descentramiento d' debido a la curva de la vía, tiene la expresión $d' = \frac{a^2}{8 \cdot R}$

Siendo R el radio de la curva

la condición exigida tiene la forma $d + d' \leq d_{max}$

Como en los apoyos se descentra el hilo de contacto hacia afuera de la curva, en un valor b , la condición anterior se convierte en $d + d' - b \leq d_{max}$

sustituyendo los valores d y d' tendremos que $\frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T} + \frac{a^2}{8 \cdot R} - b \leq d_{max}$

de donde $a \leq \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot (d_{max} + b) \cdot T}{(V \cdot R) + T}}$

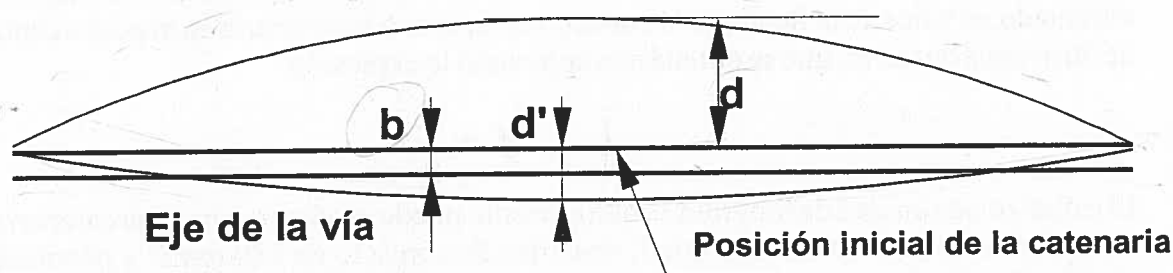


Fig. 3.4.- Desplazamiento catenaria para vía en curva

La forma práctica de determinar el descentramiento real que produce el eje de la vía a los hilos de contacto, se realiza de la siguiente forma:

1º.- Con un sedal de longitud determinada, por ejemplo 20 metros, se mide la flecha f que tiene la vía. Entendiendo como tal flecha, la distancia existente entre el sedal y el carril en el punto de máxima distancia.

2º.- Mediante la expresión $r = \frac{a^2}{8 \cdot f'}$ se calcula el radio de la curva de la vía.

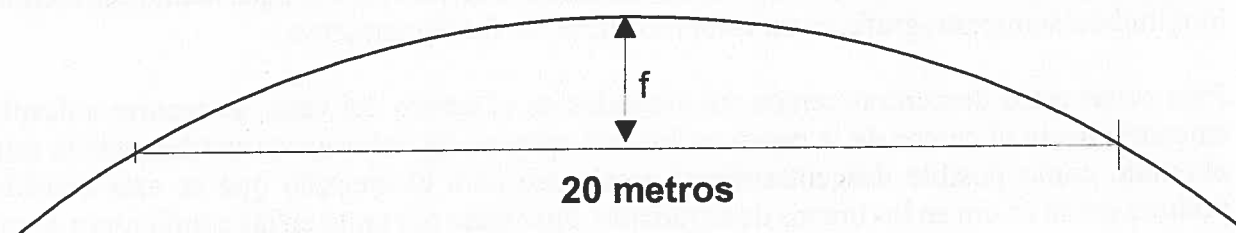


Figura 3.5.- Determinación del radio de una curva

Hemos de tener en cuenta que el radio de la curva no siempre es constante, pudiendo existir dentro de una misma curva general, varias curvas de distinto radio así como sus curvas de transición. Estos radios nos servirán para la determinación del vano máximo de la catenaria. La máxima separación entre apoyos vendrá determinada por el valor más extremo que permita la frotación del pantógrafo con la catenaria.

Considerando de nuevo la expresión
$$a \leq \sqrt{\frac{8 \cdot r \cdot (d_{\max} + b) \cdot T}{(V \cdot r) + T}}$$

La longitud del vano a viene determinada, por dicho desplazamiento máximo d_{\max} , el valor del descentramiento b que suele oscilar entre 20 y 30 cm, el radio de la curva r , la suma de las tensiones mecánicas T de los cables que intervienen en la línea aérea de contacto, (sustentador, hilos de contacto y péndolas), así como los esfuerzos V por unidad de longitud debidos al viento de dichos cables.

Así para una curva de radio 1500 metros, con una catenaria sin descentramiento en los brazos de atirantado, el valor de la flecha de la curva con respecto a la catenaria en el punto central de un vano de 60 m sería de 0,3 m, que se obtendrían aplicando la expresión

$$f = \frac{a^2}{8 \cdot r}$$

El esfuerzo por unidad de longitud V , que el viento puede producir sobre una catenaria formada por un sustentador de cobre de 153 mm², dos hilos de contacto de 120 mm², y péndolas de 16 mm², distribuidas de forma equidistante cada 4 m, sería de 2,64 kg/m.l., y se obtendría mediante la aplicación de los valores obtenidos en la tabla 3.19 Siendo $V=0,8+0,77+0,77+0,3=2,64$ kg/m.l.

El descentramiento que el viento produce en la catenaria, considerando que las tensiones respectivas de 1620 kg para el sustentador y de 1530 kg para cada hilo de contacto, se

determinaría mediante la expresión $d = \frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T}$ obtenida en el apartado 3.1.1. y que para los

valores indicados se obtiene un valor de $d=25,4$ cm, que habría que sumarlos al valor de la flecha obtenida anteriormente.

El descentramiento total en el centro del vano sería entonces el determinado por el propio radio de la curva de la vía (30 cm para el caso considerado), más el obtenido por el efecto que sobre la catenaria ejerce el viento (25,4 cm), obteniéndose un total de 55,4 cm., que aunque es menor que la longitud del semipantógrafo, es un valor no óptimo de funcionamiento.

Para evitar estos descentramientos tan acusados en el centro del vano, se recurre a desplazar la catenaria hacia el centro de la curva en los dos apoyos, un valor aproximadamente la mitad del obtenido como posible descentramiento total, que para el ejemplo que se está considerando pudiera ser de 25 cm en los brazos de atirantado, quedando por tanto en las condiciones de máximo viento un descentramiento en el centro del vano de 30,4 cm. Con viento en calma de 5 cm, y cuando el viento sople hacia el exterior de la curva con un descentramiento de -20,4 cm.

La situación particular descrita, con descentramiento próximo a valores de 25-30 cm en el apoyo, es también de alta seguridad para el pantógrafo, ya que el frotamiento en el apoyo se realiza en el semipantógrafo externo a la curva, evitándose que el extremo del pantógrafo toque el brazo de atirantado y se produzca la destrucción mutua de ambos equipos y por otro lado se compensa la inclinación que le proporciona el peralte de la curva.

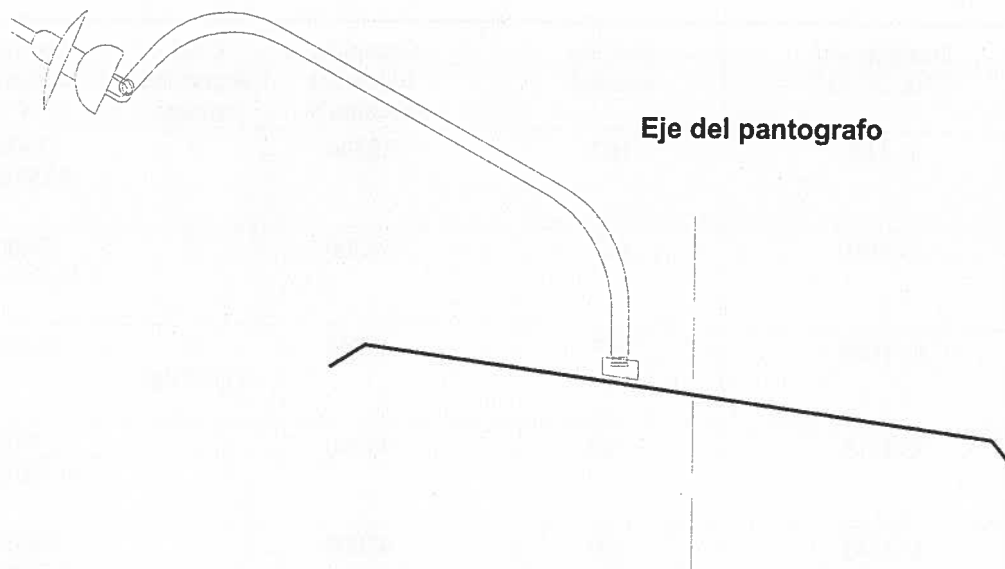


Fig. 3.6.- Efecto del atirantado en curva

Los mismos criterios anteriores adoptados para una catenaria tipo CR160 daría los siguientes resultados:

Flecha de la curva = 30 cm,

$$\text{Descentramiento por efecto del viento } d = \frac{60^2 \cdot 2,64}{8 \cdot 3389} = 35,5 \text{ cm}$$

Descentramiento total : 30 + 35,5 cm = 65,5 cm

Como el descentramiento máximo es mayor que la semilongitud del pantógrafo, se produciría inevitablemente una avería cuando se dieran las condiciones de viento adecuadas y en dicho momento estuviera circulando un tren por dicho vano.

La situación de máxima seguridad pasaría por repartir, al igual como en el supuesto anterior, los descentramientos entre el centro del vano y los apoyos. Así en este caso, cada apoyo debería estar descentrado hacia el exterior de la curva en 30 cm, con lo que en el centro del vano, el descentramiento de la catenaria respecto al eje de la vía, sería nulo, volviendo a estar nuevamente descentrado 30 cm en el siguiente apoyo. Por la acción del viento, los cables no se moverán en el apoyo, pero si lo harán en el centro del vano, y se podrán desplazar, tal y como se ha calculado en 35,5 cm, como máximo, por lo que en cualquier sentido que se desplace la catenaria, hacia el interior o exterior de la curva, se encontraría dentro de la acción del pantógrafo y con elevado grado de seguridad.

having less effect on a catenary wire than on a contact wire subjected to the same tensile force. The results of finite element analysis and the results obtained using the approximation according to equation (5.85) coincide closely.

The Re330 example also shows a good correlation of the values obtained by FEA to those obtained according to equation (5.85). In this case, calculating the wind-dependent deflection of the contact wire alone, leads to low deflection values. This is because the tensile force on the catenary wire is lower than on the contact wire, while both are exposed to the same wind load.

In the table of results obtained for these two examples, the values are given with an accuracy of three decimal places in order to show the differences between the individual methods discussed here. In practical applications, two decimal places are sufficient because of the large number of assumptions made.

5.5 Longitudinal spans and tensioning section lengths

5.5.1 Relevance of span and tension lengths

Longitudinal span lengths and *tensioning section lengths* have a considerable effect on the investment cost of overhead contact line installations. At the same time, they also affect the quality parameters such as uniformity of elasticity and contact force performance. When planning overhead contact line installations, the use of the longest possible span lengths and tensioning sections is the most effective way of reducing costs.

5.5.2 Maximum possible spans

5.5.2.1 Significant parameters

So far as the geometrical interactions are concerned, the *maximum possible span length* is the distance between two supports where it is certain that the contact wire will not move out of the range of operation of the collector strips on the pantograph, after considering the anticipated vehicle motion and the effect of given wind conditions. Using this definition, the maximum possible span length depends on:

- the *operating range of the pantograph* collector head,
- the *wind speed* assumed when designing the system,
- the *lateral displacement* of the pantograph at the point of contact at operating height, and
- on the *overhead contact line type*, especially on the tensile forces acting on the contact wire and the catenary wire.

The parameters wind speed and overhead contact line type, incorporating parameters such as wire diameter and tensile forces, have been discussed in the preceding clauses. In the following sections, the vehicle-related effects on permissible longitudinal span lengths of overhead contact line installations are analysed.

5.5.2.2 Working range of pantograph head

The *pantograph head working range* that ensures a safe contact between the collector strips and the contact wire, in accordance with Figure 2.16, is determined by the design of the pantograph head. This is accepted as being larger than the length of the collector strips because it is assumed that the contact wire rarely runs outside the collector strips right up to the limit of the working range. For example, the DB standard pantograph head used for speeds up to 280 km/h is 1950 mm wide. The *pantograph head working range* is 1450 mm and the collector strip length is 1030 mm. When discussing the geometrical interaction between contact line and pantograph, the lateral movement of the vehicle and its effects on the pantograph position must also be considered.

There are two basic conditions to be assessed:

- The first condition refers to still air. In this condition the geometric contact wire position without wind load as expressed by the stagger at the supports and the offset at mid span should not leave the collector strips. The sway of the vehicles must also be considered.
- In the second condition, the action of the maximum design wind is assumed in addition to the aspects of the first condition. Under this condition the contact wire may use the pantograph beyond the collector strips and defined as working range.

Parameters, especially span lengths, have to be selected such that these conditions are met. However, it should be noted that in the case of contact lines for train speeds above 230 km/h, it might be necessary to limit the span lengths to achieve a target elasticity and improve the dynamic interaction between pantograph and contact line (see clause 9.5.5.2).

5.5.2.3 Lateral movement of the vehicle

The effect of the *lateral movement of the vehicle* at the collector's working height depends on

- contact wire height and collector working height.
- the rolling coefficient and rolling height at the collector interface.
- the geometry and characteristics of the wheel sets and of the bogies,
- the height of the pantograph knuckle and the pantograph flexibility and structural tolerances,
- the track gauge, curve radius, cant deficiency, the lateral track shift and deficiency in cross level and tolerances.

In particular, the lateral displacement of the collector head at its operating height is a specific characteristic of the vehicle. All DB overhead contact line installations for running speeds of up to 200 km/h are designed to allow kinematic displacements of the centre of the collector relative to the track centre line, as shown in Figure 5.16. For high-speed rail traffic, it is desirable to design the overhead contact lines to accommodate vehicles which are standardized throughout Europe. In this case, conformance with the limits of the individual parameters in accordance with UIC code 606-1 is required. Figure 5.17 shows the relationship between the kinematic displacement of the collector

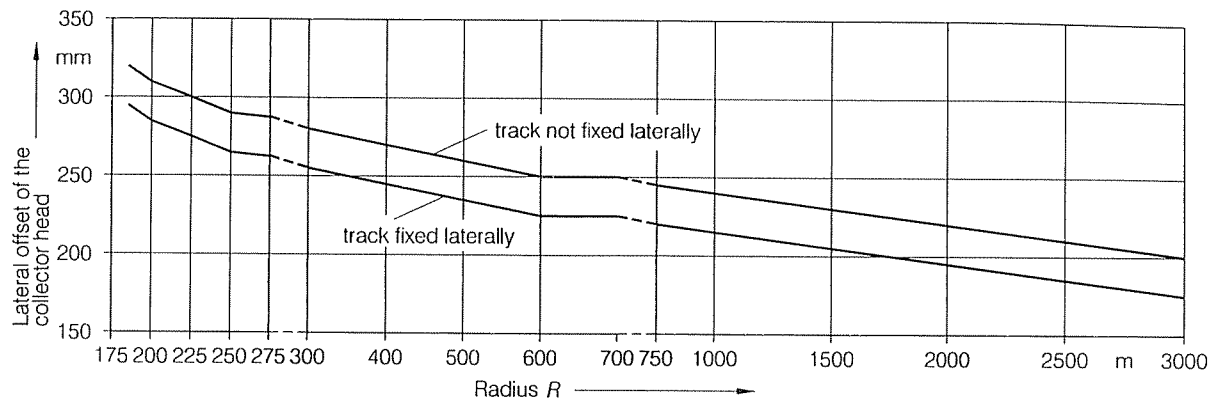


Figure 5.16: Lateral offset of the collector head used by the Deutsche Bahn as a basis for calculating the limits of the contact wire positions, for a contact wire height of 5,30 m, as a function of the curve radius.

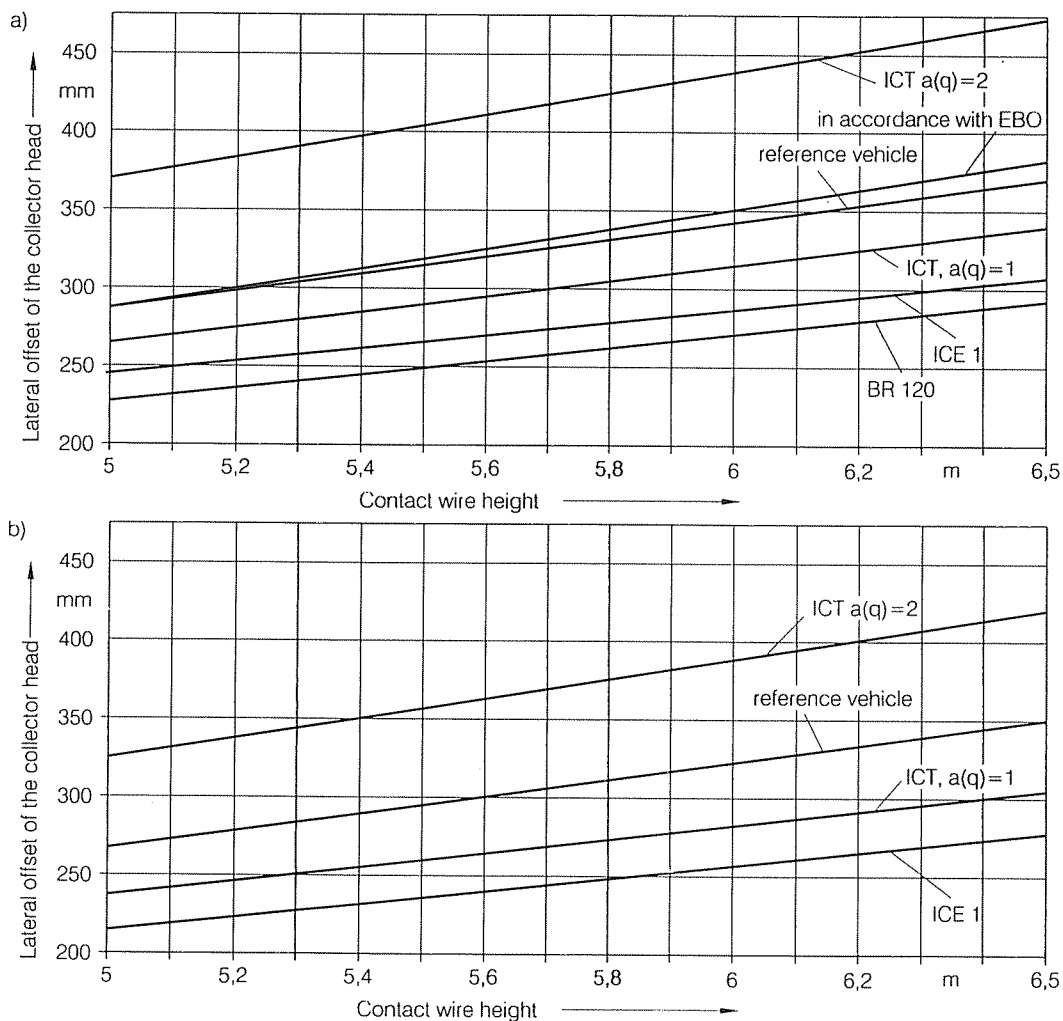


Figure 5.17: Lateral offset of the collector head of selected vehicles for $R = 250$ m (a) and $R = 1000$ m (b) as a function of the contact wire height.

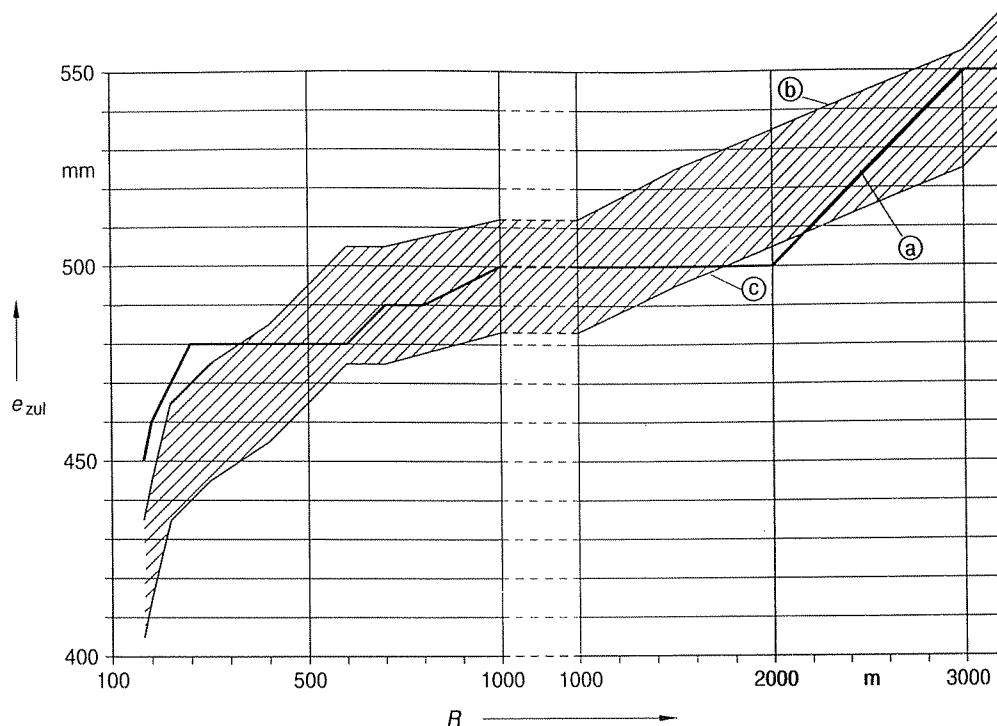


Figure 5.18: Limit positions of the contact wire with deflection by wind, as specified by the DB.

- a) limit position in accordance with No. 9 Ebs 02.05.06
- b) limit position determined from Figure 5.17, track fixed laterally
- c) limit position determined from Figure 5.17, track not fixed laterally

centre of various vehicles and the contact wire height for curve radii of 250 m and 1000 m. The vehicles indicated by the abbreviation ICT are equipped with automatic in-curve tilting mechanisms.

5.5.2.4 Contact wire limit position with deflection by wind

By subtracting the *kinematic displacement* of the centre of the pantograph head from its working range, a range is obtained within which the contact wire may be positioned. In Figure 5.19, the permissible contact wire limit positions including wind deflection, combine the interaction of the operating range of the pantograph head and the *kinematic displacement*, for both maximum speed and low speeds, about the centre of the pantograph head relative to the plane through the centre of the line connecting the railheads and perpendicular to this line, (also known as the *canted track centre line*). The limit position on the inside of the curve is deduced from the working range limits at maximum speed and the limit position on the outside of the curve from the working range limits at low speeds. Relative to the track centre line and with a collector head operating width of 1450 mm, the contact wire position limit at the outside of the curve for wind loads is 725 mm. For the inside of the curve, the contact wire limit position is deduced, as shown in Figure 5.19, from the track radius-dependent collector head position limits according to Figure 5.18 and the value 725 mm, which is half the collector

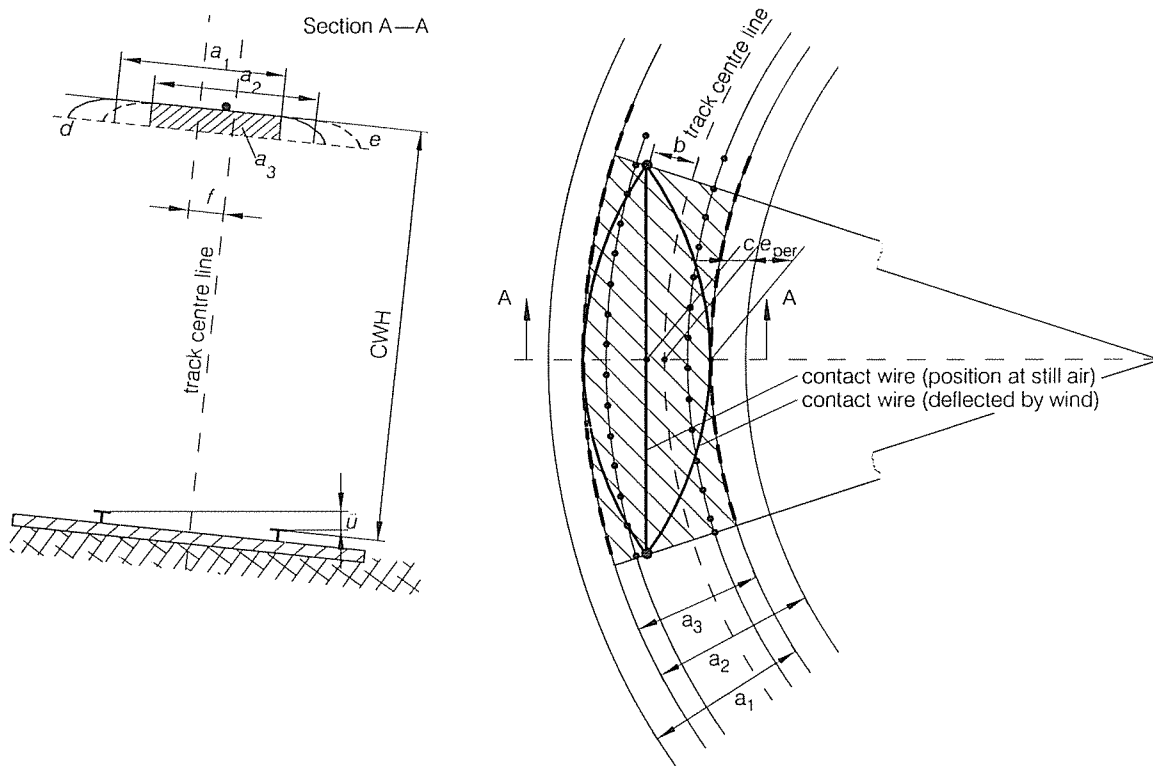


Figure 5.19: Determination of the permitted contact wire limit positions, with and without wind action.

- — — limit position with wind action
- limit position in still air
- a_1 operating range of collector head at maximum speed
- a_2 operating range of collector head at low speeds
- a_3 range of permitted contact wire position with wind load
- d collector head position at maximum speed
- e collector head position at low speeds
- f lateral offset of the collector head at maximum speed

head working range.

In still air, the contact wire should interface with the pantograph head in the range of the collector strips. On standard pantograph designs used by the DB, the collector strips are 1030 mm long. Because of this, the stagger at the supports is limited to ± 400 mm. It is not possible to fully exploit the maximum offset at the supports that is theoretically possible with the whole working range of the pantograph head. On the outside of the curve, contact wire positions up to 515 mm are permissible, on the inside of the curve, the track radius-dependent values are permitted as shown in Figure 5.18 which have been derived from the lateral pantograph sway in accordance with Figure 5.17.

The *track radius-dependent position limits* for the contact wire, shown in Figure 5.18, are applied when planning overhead contact line installations for DB. The data in Figure 5.18 is based on DB standard 9 Ebs 02.05.06. The offset corresponds only to the wind deflection of the contact wire if the contact wire is on the track centre line at

the centre of the span, that is, the distance of the contact wire from the track centre line at this point, the *c-value* equals zero. In other cases, the contact wire position limit is the sum of the *c-value* and the deflection due to wind. Figure 5.19 indicates how these factors are related.

The SNCF specifies a uniform limit position of 350 mm for all curve radii. This is to accommodate pantograph heads with shorter effective widths than on DB.

5.5.2.5 Determination of longitudinal span lengths

Conductor displacement due to wind is the decisive overhead contact line factor governing *longitudinal span lengths*. If the permitted contact wire position limits with wind action are known, the equations shown in clause 5.4 can be used as a basis for calculating maximum possible longitudinal spans.

For straight track, the maximum possible longitudinal span length is derived using the designations in accordance with Figure 5.11 and equation (5.64) with $b_i = b_1$ und $b_{i+1} = -b_2$ to give:

$$l_{\max} = \sqrt{\frac{2H}{F'_W} \left(2e_{\text{per}} - b_1 + b_2 + \sqrt{(2e_{\text{per}} - b_1 + b_2)^2 - (b_1 + b_2)^2} \right)} \quad (5.86)$$

In practice, this equation, which applies to the contact wire alone, can be extended to the contact line equipment. In this case

$$H_{\text{OHL}} = H_{\text{CW}} + H_{\text{CA}}$$

is used in place of H and

$$F'_{\text{WOHL}} = F'_{\text{WCW}} + F'_{\text{WCA}}$$

in place of F'_W . Whether or not this approximation is acceptable depends on the ratio of the contact wire deflection by wind to the catenary wire deflection by wind. If a more accurate calculation of the maximum permissible span is desired, the mechanical interaction (by droppers) of the catenary and the contact wire must be taken into account as described in clause 5.4.3.

For the case that the dimensions b are all equal, i. e. $b_1 = b_2 = b$, as used in practical applications, (5.86) can be simplified to:

$$l_{\max} = 2 \sqrt{\frac{H}{F'_W} \left(e_{\text{per}} + \sqrt{e_{\text{per}}^2 - b^2} \right)} \quad (5.87)$$

Example: What is the maximum longitudinal span that can be used for a DB standard overhead contact line installation for running speeds of up to 200 km/h? From Figure 5.18, the position limit value $e_{\text{per}} = 0,55$ m and the wind load per unit length is 11,5 N/m from Table 5.7.

The horizontal tensile forces on the catenary wire and on the contact wire are 10 kN each. For the offset b value of 0,4 m

$$l_{\max} = 2 \sqrt{\frac{20\,000 \text{ N} \cdot \text{m}}{11,5 \text{ N}} \left(0,55 \text{ m} + \sqrt{0,55^2 \text{ m}^2 - 0,4^2 \text{ m}^2} \right)} = 80,3 \text{ m}$$

In the case of an 8 % reduction of the tensile forces near the mid-point support, a maximum span length, i. e. support spacing of 77,1 m would be permissible, if the reduction is 11 %, the maximum permissible support spacing would be 75,8 m.

As illustrated in Figure 5.12, the maximum possible longitudinal span length in a curve depends on whether the wind blows from inside the curve or outside the curve. For practical applications, only the case where the wind blows from outside the curve is of significance. If $e = e_{\text{per}}$ is inserted in equation (5.75), the equation for the maximum possible longitudinal span length in a curve is

$$l_{\text{max}} = \sqrt{8(e_{\text{per}} + b) / \left(\frac{F'_W}{H} + \frac{1}{R} \right)} \quad (5.88)$$

Example: What is the maximum longitudinal span that can be used for a DB standard overhead contact line for running speeds up to 200 km/h on a curve of radius 250 m?

For this calculation, a reduction in the tensile force by 8 % must be taken into account at the mid-point support, i. e. the tensile force is 20 kN – 1,6 kN = 18,4 kN. In accordance with Table 5.7, the wind load per unit length is 11,5 N/m. In accordance with Figure 5.19, for $b = 0,4$ m and $e_{\text{per}} = 0,47$ m

$$l_{\text{max}} = \sqrt{8(0,47 \text{ m} + 0,4 \text{ m}) / \left(\frac{11,5 \text{ N/m}}{18\,400 \text{ N}} + \frac{1}{250 \text{ m}} \right)} = 38,8 \text{ m}.$$

If the offset values b at consecutive supports along the curve are not equal and the values $b_i = b_1$ and $b_{i+1} = b_2$ are applied to Figure 5.12 or equation (5.74), it can be shown that an equation for determining the maximum longitudinal span length can also be applied to contact line systems, provided that the substitutions (5.81) and (5.82) are applicable to the case. The following equation, first described in [5.5], applies in cases where the wind blows from outside the curve:

$$l_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{F'_W + H/R} \left(2e_{\text{per}} + b_1 + b_2 + \sqrt{(2e_{\text{per}} + b_1 + b_2)^2 - (b_1 - b_2)^2} \right)} \quad (5.89)$$

Table 5.9 contains values describing the relationship between longitudinal span length and curve radii as specified by the DB and by the SNCF.

5.5.3 Calculating tensioning section lengths (tension lengths)

The standard EN 50119 calls this parameter the “*tension length*” and defines it as the “length of conductor between two anchoring points”. Generally, however, a contact wire or contact line equipment is tensioned by pulling it away in both directions from an anchoring point located roughly at the centre of a tensioning section. In order to be able to describe the physical problems involved, the section between the anchoring point and the tensioning equipment is assigned the length L . It can be assumed that the tensioning section (tension length) then has the length $2 \cdot L$, that is, the anchoring point is considered to be at the middle of the line section under consideration.

Table 5.9: Relationship of longitudinal span length to the curve radius, as specified by DB and the SNCF.

Radius m	Longitudinal span length m	
	DB	SNCF
≥ 2000	80,0	63,0
1800	79,8	63,0
1600	77,5	
1500	76,2	
1400	74,7	
1350		58,5
1300	73,2	
1200	71,6	
1100	69,7	
1050		54,0
1000	67,7	
900	65,1	
850		49,5
800	62,5	
700	59,8	
650		45,0
600	56,1	
500	52,4	40,5
400	47,9	36,0
300	42,5	31,5
250	38,6	
180	33,4	

Tension lengths affect the installation investments. The number of overlaps decreases with increasing tension lengths, which means that installation investments decrease accordingly. Use of the longest tension lengths possible without forfeiting conformity with the specified quality parameters is one of the main goals in designing an overhead contact line installation.

The tension lengths that can be achieved depend on a large number of factors as discussed in clause 4.1.10. The main factors are:

- the *working range of the tensioning equipment*;
- the *variations in the horizontal tensile forces* acting on the wires due to the reaction forces and also acting on the number of spans in a half tension length, the stagger and the distance between the pole and the track centre line;
- the *operating tensile stress* that can be achieved, depending on the tensile strength of the conductor material;
- the variation of the lateral offset or stagger of the contact wire at the supports due to thermal expansion and contraction of the conductors, whereby the cantilever lengths and the nominal temperature also have an effect;
- the curve radii;
- given, i. e. expected, wind speed;
- overhead contact line temperature range, as well as
- mechanical design of the tensioning mechanisms.

Clause 6.5 contains further discussions concerning the choice of tension lengths.

5.6 References

- 5.1 *Kießling, F.; Semrau, M.; Tessun, H.; Zweig, B.-W.*: Neue Hochleistungsoberleitung Bauart Re 330 der Deutschen Bahn (The new high-performance overhead contact line type Re 220 of German Railway). In: *Elektrische Bahnen* 92(1994)8, pp. 234 to 240.
- 5.2 *Bausch, J.; Kießling, F.; Semrau, M.*: Hochfester Fahrdrabt aus Kupfer-Magnesiumlegierungen (High-strength contact wire made of copper magnesium alloys). In: *Elektrische Bahnen* 92(1994)11, pp. 295 to 300.
- 5.3 *Gourdon, Ch.*: Die TGV-Oberleitungsanlage der SNCF (The TGV overhead contact line of SNCF). In: *Elektrische Bahnen* 88(1990)7, pp. 285 to 290.
- 5.4 *Süberkrüb, M.*: Technik der Bahnstromleitungen (Technology of overhead contact lines). Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München, 1971.
- 5.5 *Naderer, G.*: Die Fahrleitung, Bauweise und Speiseleitungen (The overhead contact line, design and feeder lines). In: *Elektrische Bahnen* 11(1935), pp. 65 to 75 and pp. 112 to 117.
- 5.6 *Krumpolt, J.*: Optimierung von Oberleitungsanlagen elektrischer Bahnen (Optimizing of overhead contact lines for electrical railways). Diploma thesis. TU Dresden, Institut Elektrische Bahnen, 1996.
- 5.7 *Fischer, R.; Kießling, F.*: Freileitungen, Planung, Berechnung, Ausführung (Overhead power lines, planning, analysis and design). 4th edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1993.
- 5.8 *VEM handbook: Energieversorgung elektrischer Bahnen* (Power supply of electrical railways). Verlag Technik, Berlin, 1975.
- 5.9 *Wlassow, I. I.*: Fahrleitungsnetz (Overhead contact line network). Fachbuchverlag, Leipzig, 1955.